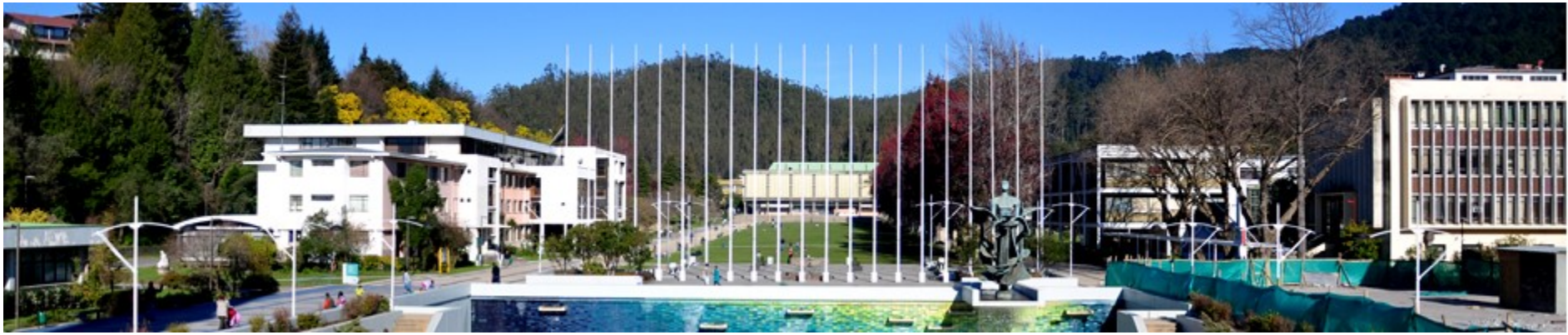
Fundamentos de Tribología

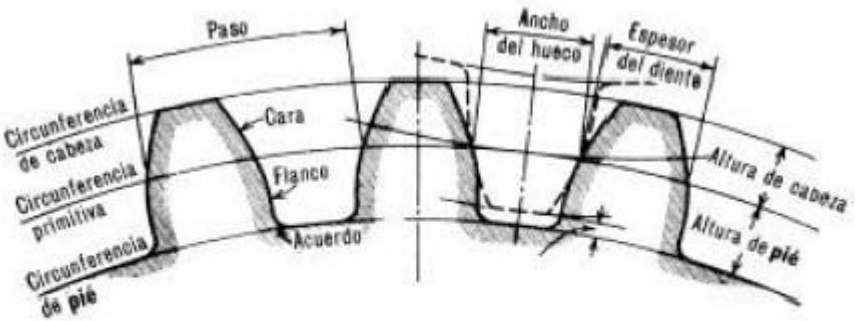


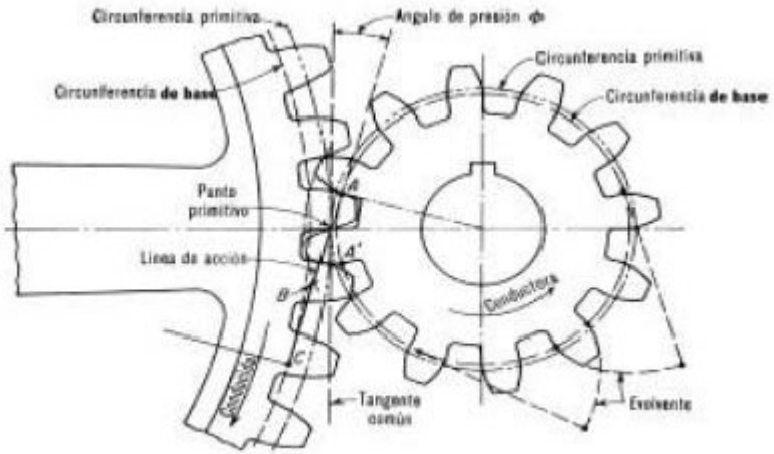
ENGRANAJES – CABLES - CADENAS – DESLIZANTES

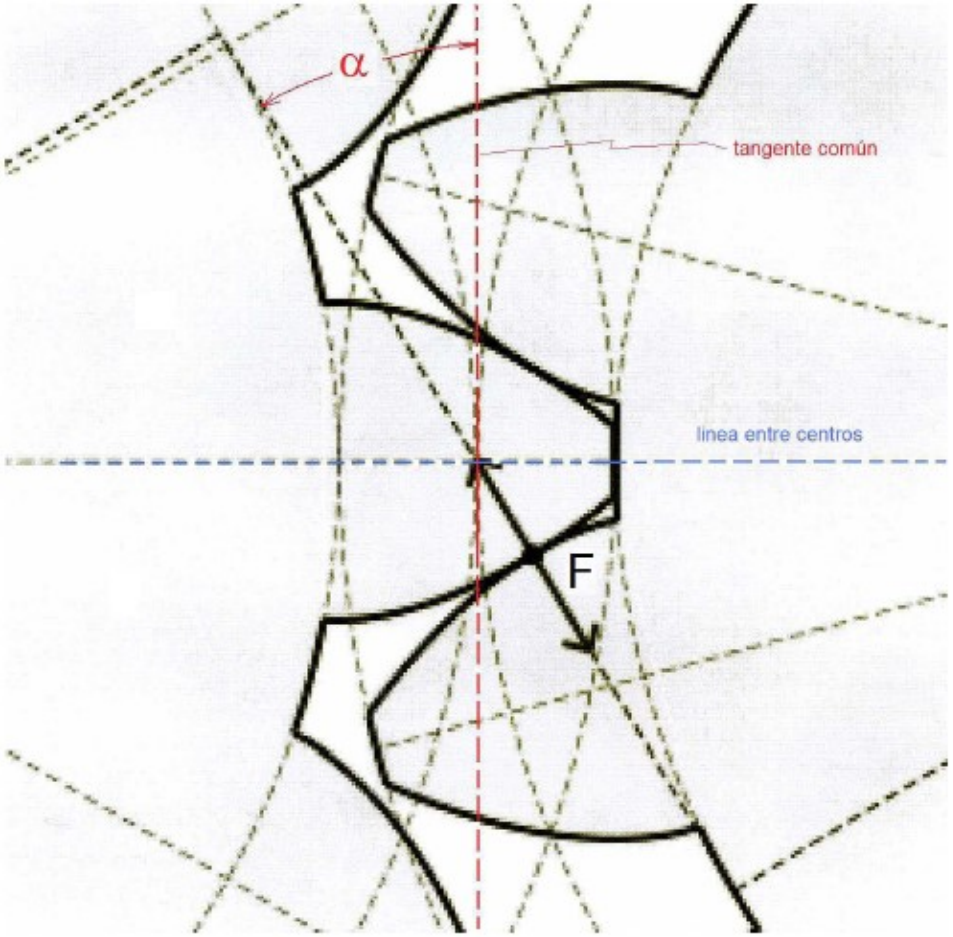
Gabriel Barrientos 2026

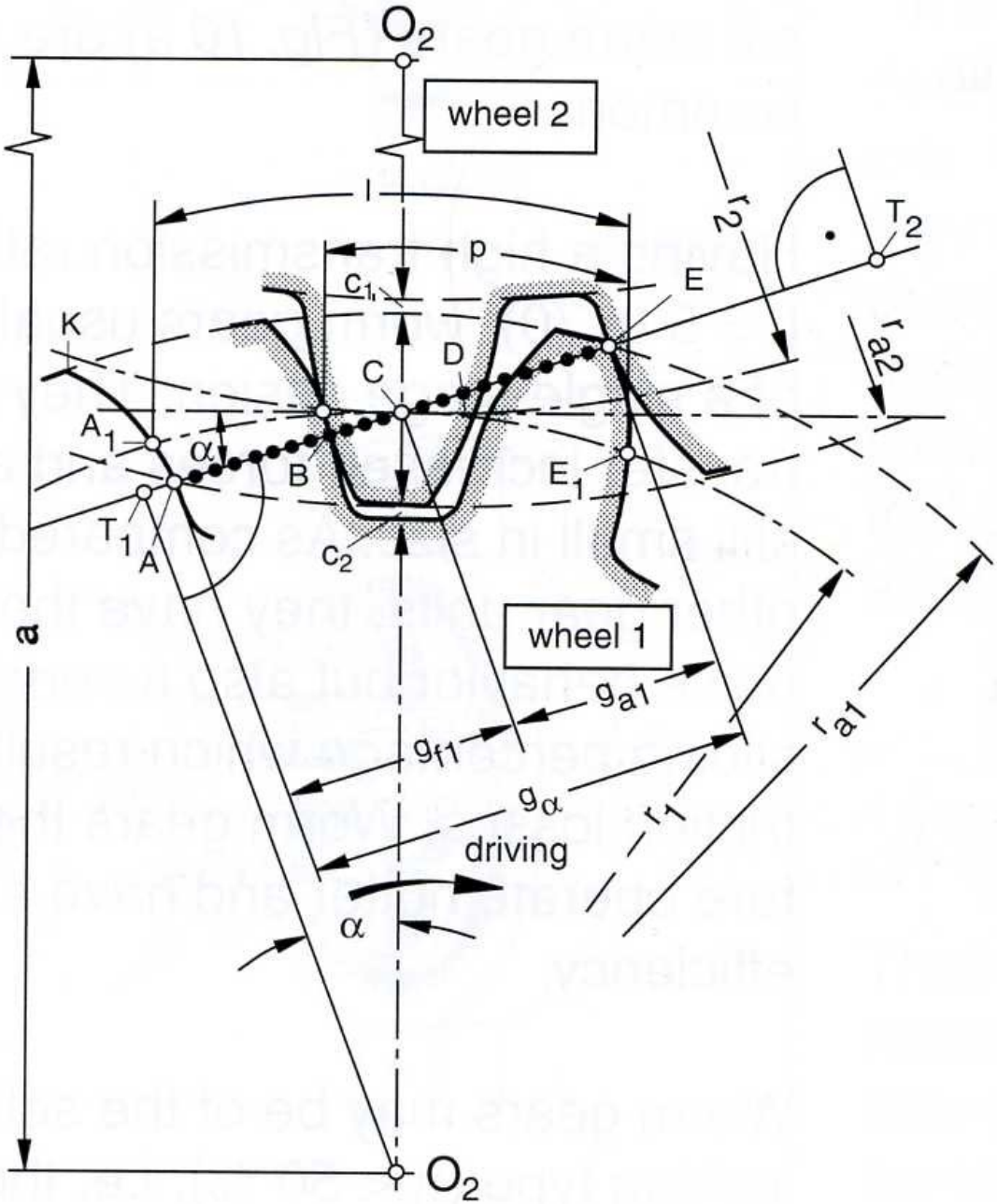
DEPARTAMENTO INGENIERIA MECANICA - UNIVERSIDAD DE CONCEPCION

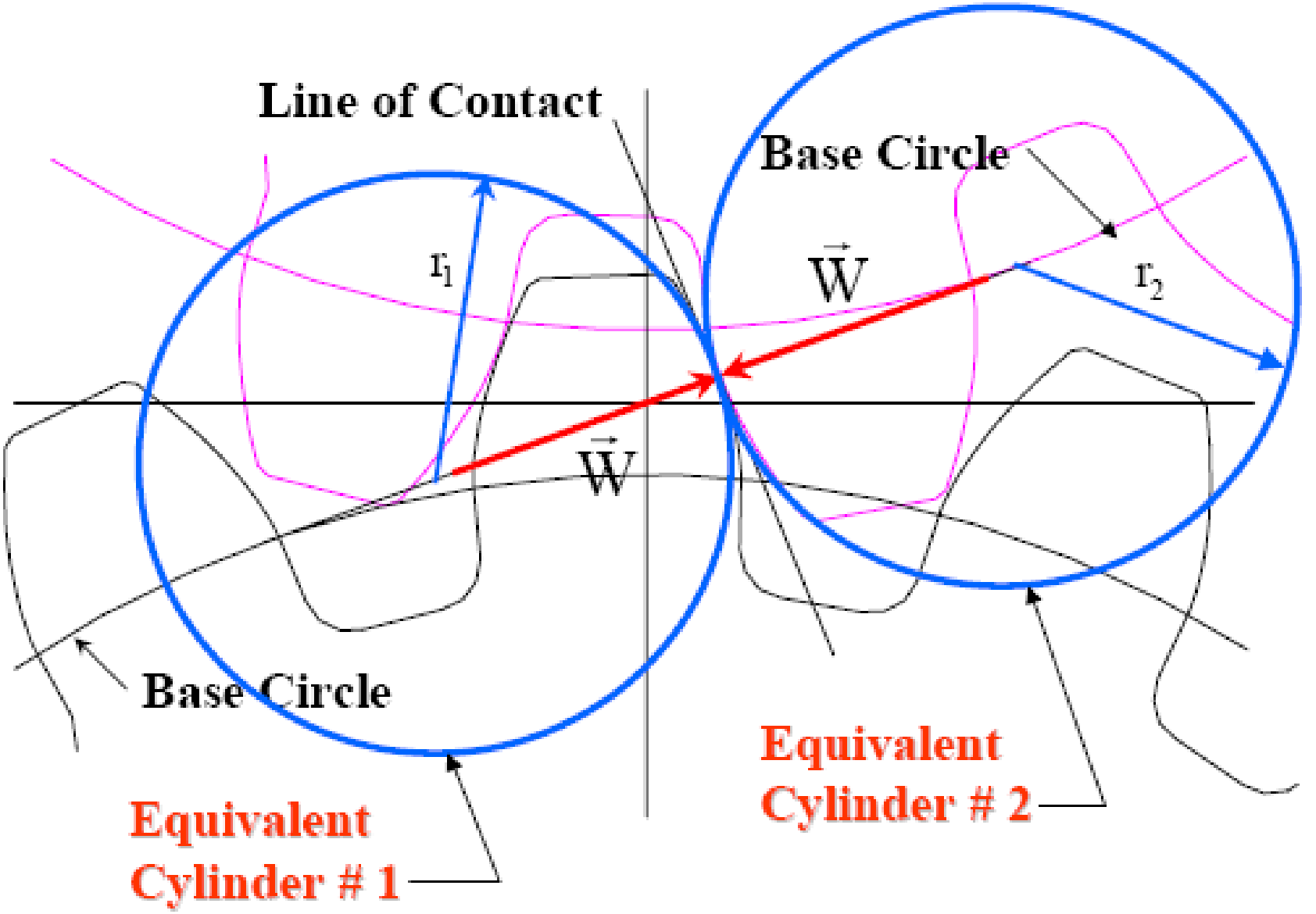
ENGRANAJES


Paso
Ancho del hueco
Espesor del diente
Circunferencia de cabeza
Cara
Circunferencia primitiva
Flanco
Circunferencia de pié
Acuerdo
Altura de cabeza
Altura de pié


Circunferencia primitiva
Angulo de presión φ
Circunferencia de base
Circunferencia primitiva
Circunferencia de base
Punto primitivo
Línea de acción
Conductora
Tangente común
Evolvente


α
tangente común
linea entre centros
F


O2
wheel 2
l
p
c1
E
T2
r2
ra2
K
C
D
A1
α
B
E1
T1
A
c2
a
wheel 1
ga1
gf1
gα
ra1
r1
driving
α
O2


Line of Contact
Base Circle
r_1
$\vec{W}$
r_2
$\vec{W}$
Base Circle
Equivalent
Cylinder # 2
Equivalent
Cylinder # 1

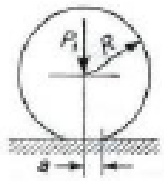
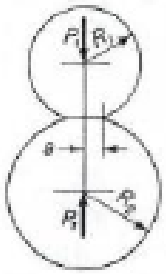
esquema representativo	Esferas en contacto	cilindros en contacto
	$P_0 = 0{,}616\sqrt[3]{\frac{P}{R^2}\left(\frac{E_1E_2}{E_1+E_2}\right)^2}$ $a = 0{,}880\sqrt[3]{PR\left(\frac{1}{E_1}+\frac{1}{E_2}\right)}$	$P_0 = 0{,}591\sqrt{\frac{P_1E_1E_2}{R(E_1+E_2)}}$ $a = 1{,}076\sqrt{\frac{P_1R(E_1+E_2)}{E_1E_2}}$
	$P_0 = 0{,}616\sqrt[3]{P\left(\frac{1}{R^2}+\frac{1}{R_2}\right)^2\left(\frac{E_1E_2}{E_1+E_2}\right)^2}$ $a = 0{,}880\sqrt[3]{\frac{PR_1R_2}{(R_1+R_2)}\left(\frac{1}{E_1}+\frac{1}{E_2}\right)}$	$P_0 = 0{,}591\sqrt{\frac{P_1E_1E_2}{(E_1+E_2)}\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)}$ $a = 1{,}076\sqrt{\frac{P_1R_1R_2}{(R_1+R_2)}\left(\frac{1}{E_1}+\frac{1}{E_2}\right)}$
	$P_0 = 0{,}616\sqrt[3]{P\left(\frac{1}{R^2}-\frac{1}{R_2}\right)^2\left(\frac{E_1E_2}{E_1+E_2}\right)^2}$ $a = 0{,}880\sqrt[3]{\frac{PR_1R_2}{(R_2-R_1)}\left(\frac{1}{E_1}+\frac{1}{E_2}\right)}$	$P_0 = 0{,}591\sqrt{\frac{P_1E_1E_2}{(E_1+E_2)}\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)}$ $a = 1{,}076\sqrt{\frac{P_1R_1R_2}{(R_2-R_1)}\left(\frac{1}{E_1}+\frac{1}{E_2}\right)}$

Figura 1.11: Cálculo de esfuerzos de contacto. Teoría de Hertz

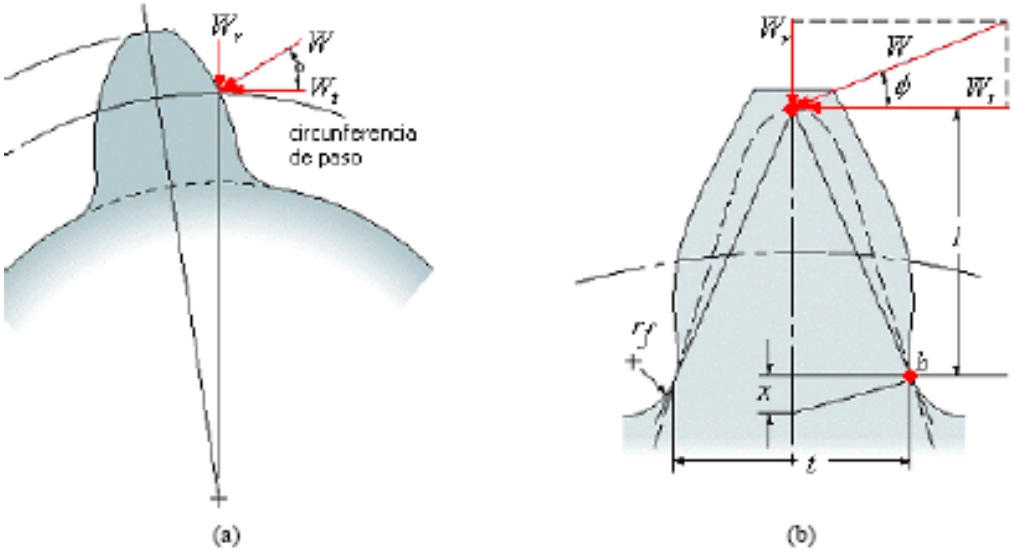


Figura 9.37. (a) Distribución de cargas en un engranaje recto. (b) cargas hipotéticas en un diente

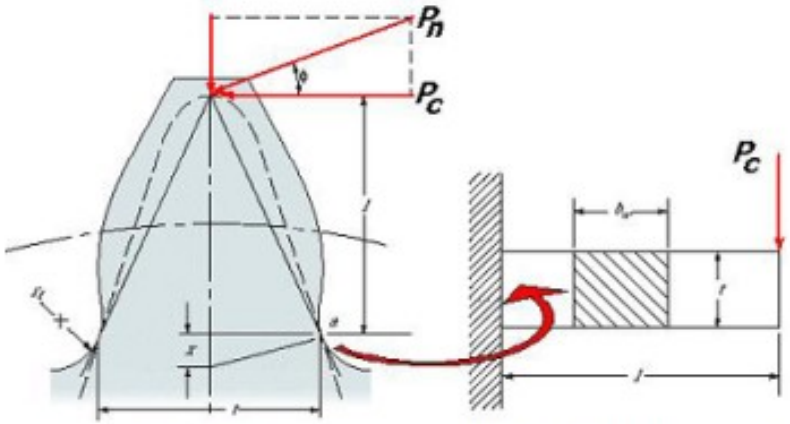
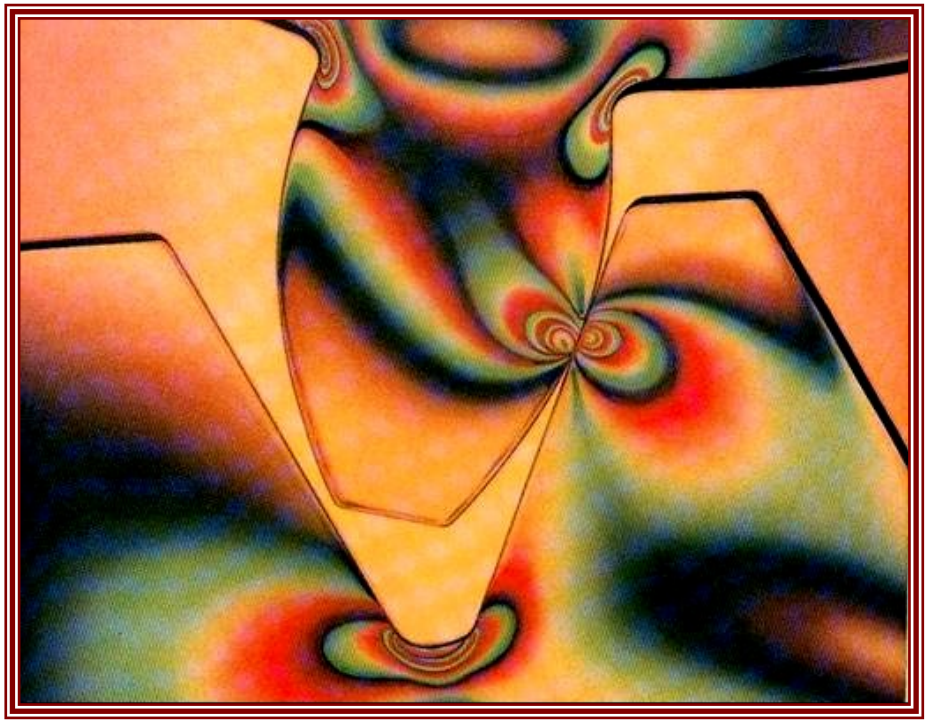
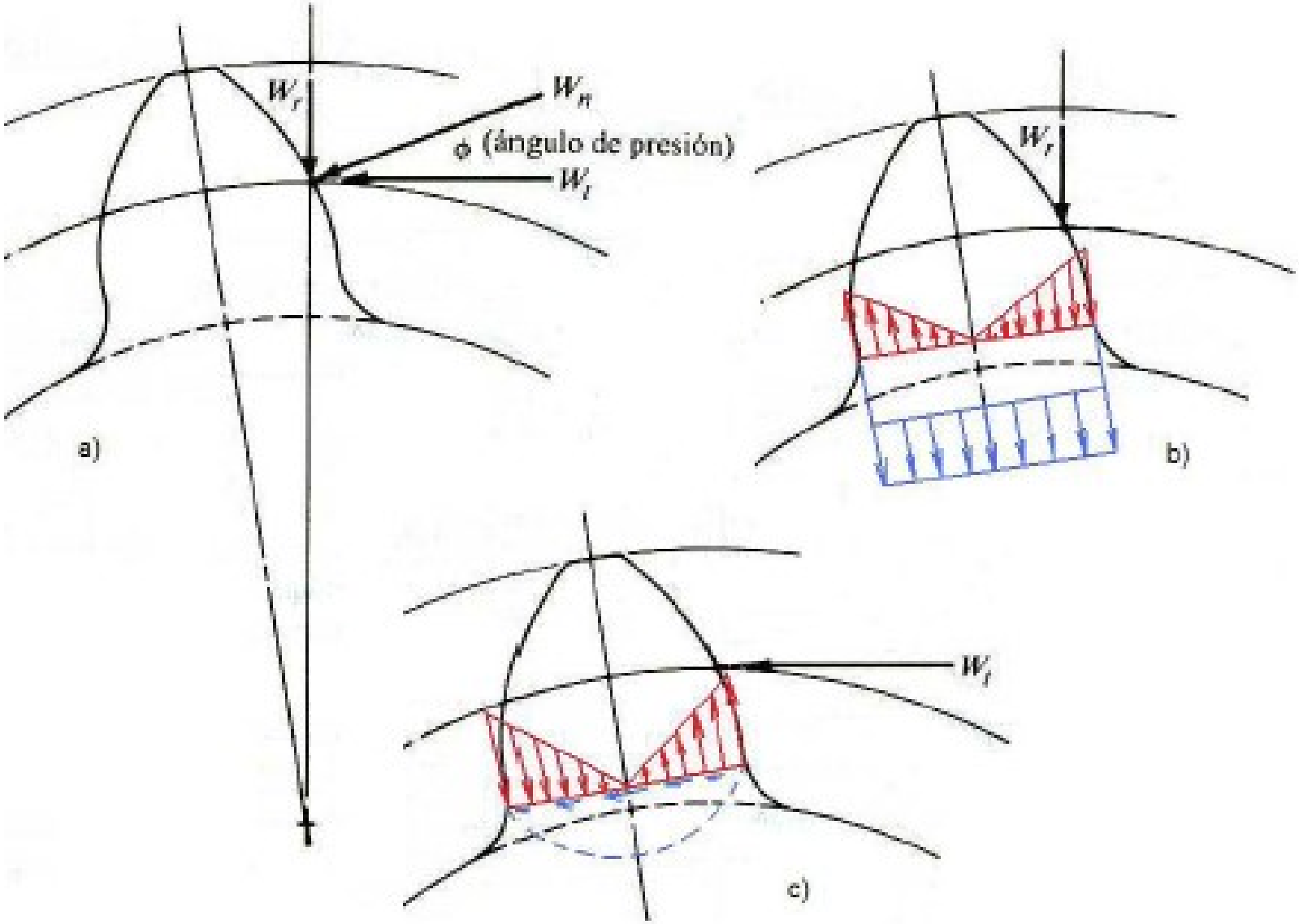
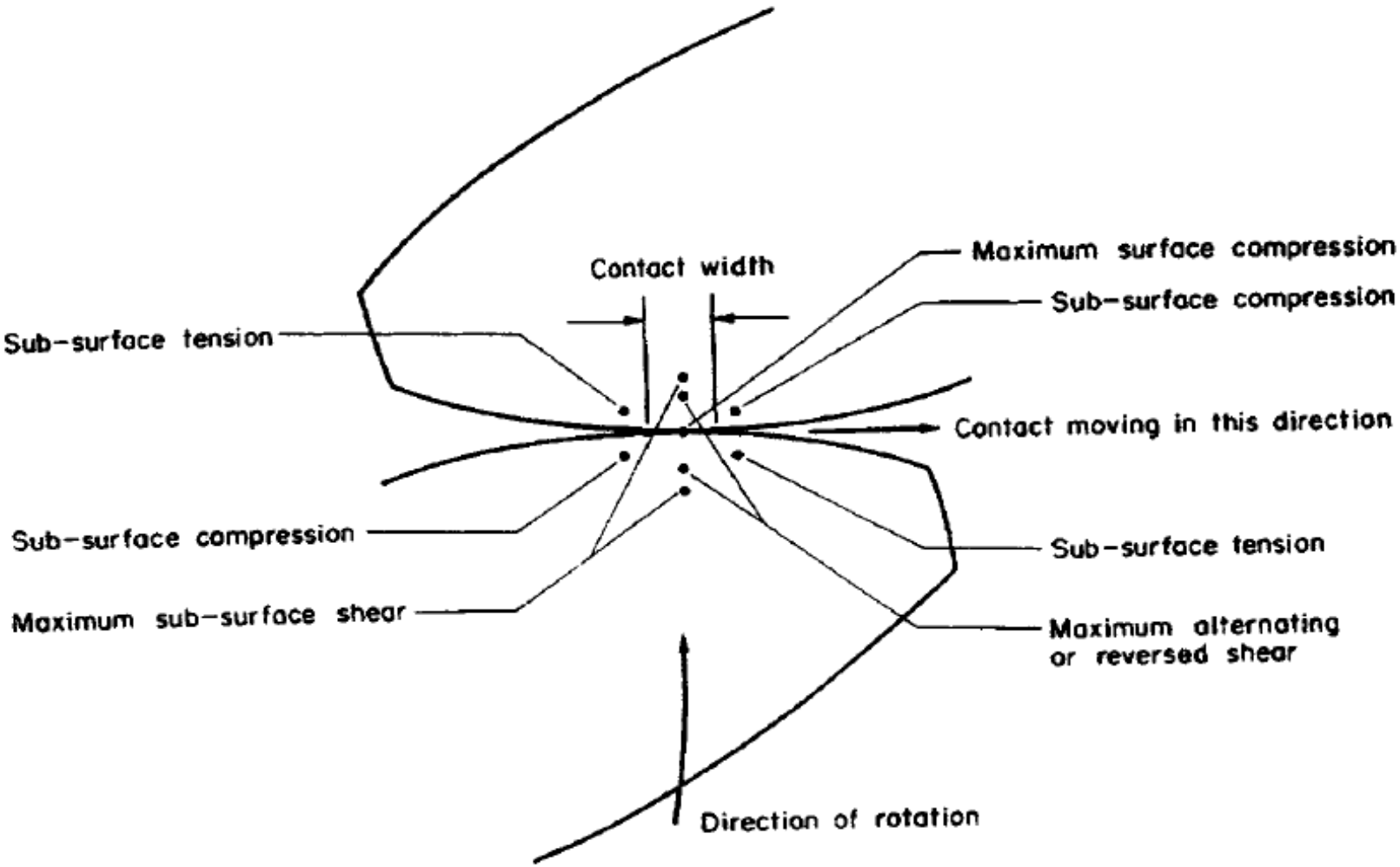
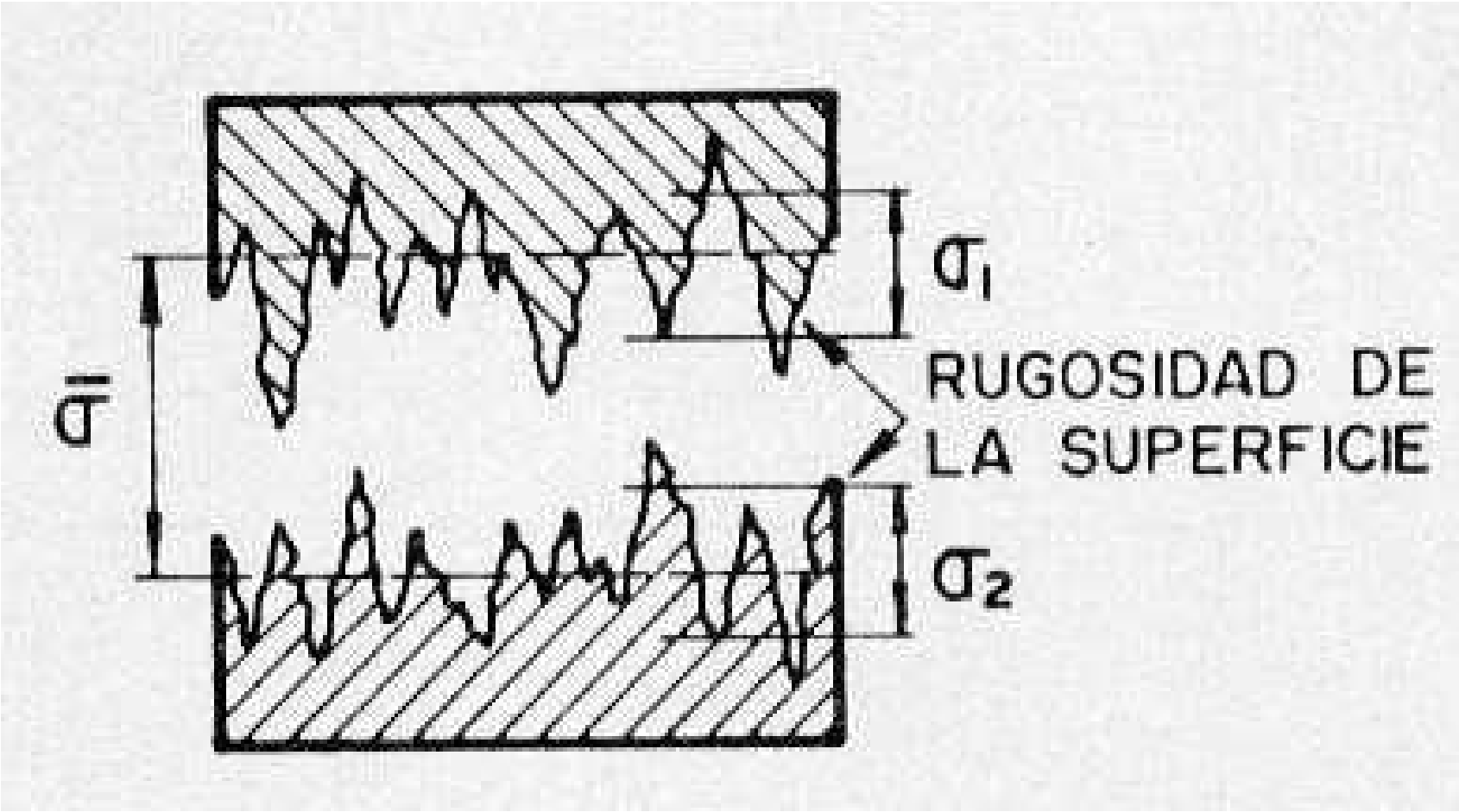


Figura 2.11. Cálculo de Engranajes: Ejemplo de Modelo Unidimensional.




W_r
W_n
ϕ (ángulo de presión)
W_t
a)
W_r
b)
W_t
c)


Contact width
Maximum surface compression
Sub-surface compression
Sub-surface tension
Contact moving in this direction
Sub-surface compression
Sub-surface tension
Maximum sub-surface shear
Maximum alternating or reversed shear
Direction of rotation


σ_1
RUGOSIDAD DE
LA SUPERFICIE
$\bar{\sigma}$
σ_2

Características importantes en la selección de lubricantes para engranajes

Viscosidad adecuada		Es la propiedad más crítica. La viscosidad correcta asegura el espesor adecuado de la película de aceite, separando las superficies de contacto y evitando el desgaste. La selección de la viscosidad debe considerar la velocidad de operación, la temperatura ambiente y las cargas aplicadas.
Capacidad de carga (EP - Extrema Presión)		Para engranajes sometidos a altas cargas, es esencial que el lubricante tenga aditivos EP para evitar el contacto metal con metal y el desgaste por fatiga.
Temperatura de operación		Debe seleccionarse un lubricante cuyo rango de temperatura de trabajo se adapte a las condiciones ambientales y de funcionamiento del equipo.
Tipo de engranaje y lubricación	abiertos	Requieren grasas de alta adherencia o aceites adhesivos para evitar pérdidas por salpicadura.
	Cerrados	Generalmente utilizan aceites fluidos para una lubricación más uniforme y eficiente.
Resistencia al agua y protección anticorrosiva		En ambientes húmedos, el lubricante debe repeler el agua y proteger los engranajes contra la corrosión.
Reducción de ruido y vibraciones		Lubricantes con propiedades adecuadas pueden ayudar a amortiguar el ruido y las vibraciones, mejorando la operación suave de los engranajes.
Compatibilidad con materiales y componentes		Es importante que el lubricante sea compatible con los materiales de los engranajes (como bronce o latón) y otros componentes del sistema, para evitar daños químicos.

Algunos tipos de lubricantes utilizados

Tipo de lubricante	Aplicaciones típicas	Características principales
Aceites R&O (con inhibidores de herrumbre y oxidación)	Engranajes de alta velocidad y cargas ligeras a moderadas	Buena protección contra oxidación y herrumbre. Adecuados para rodamientos y engranajes en sistemas compartidos.
Aceites EP (Extrema Presión)	Engranajes sometidos a altas cargas y deslizamiento moderado a alto	Excelente capacidad de carga, protección contra desgaste por fatiga y picaduras.
Aceites compuestos	Transmisiones tipo sinfín con alto deslizamiento	Reducen la fricción y el calor, mejoran la eficiencia en aplicaciones específicas.
Aceites sintéticos	Condiciones extremas de temperatura o cuando se requiere mayor eficiencia	Mejor estabilidad térmica, intervalos de cambio más largos, menor consumo de energía.
Grasas	Engranajes abiertos o situaciones donde hay posiubilidades de fugas	Alta adherencia, protección prolongada, ideal para aplicaciones difíciles de re-lubricar frecuentemente.

Observaciones:

- **Consultar siempre especificaciones del fabricante del equipo (OEM):** conocer los requisitos exactos de viscosidad y tipo de lubricante.

- **Si no hay información del OEM**, puedes utilizar normas como **AGMA 9005-F16** ó **ISO VG** y determinar el grado de viscosidad apropiado según las condiciones de operación.

Con estas consideraciones, podrás seleccionar el lubricante más adecuado para tus engranajes, asegurando un rendimiento confiable y una vida útil prolongada.

Resumen comparativo de Métodos:

Método	Precisión	Complejidad	Uso Recomendado
OEM	Muy alta	Baja	Siempre que sea posible
Normas AGMA/ISO	Alta	Media	Cuando no hay datos OEM
Cálculo EHL	Muy alta	Alta	Aplicaciones críticas o de precisión
Ensayos de laboratorio	Alta	Alta	Validación de lubricantes nuevos
Tablas de aplicación	Media	Baja	Selección rápida y general

Tipo de Engranaje	Velocidad	Carga	Temperatura	Viscosidad ISO VG	Tipo de Aceite
Helicoidal	Alta	Media	< 60 °C	68-100	Mineral + EP
Sinfin	Baja	Alta	< 80 °C	460-680	Sintético PAO
Cónico	Media	Alta	> 80 °C	220-320	Sintético + EP

1. Método del Fabricante del Equipo (OEM)

Descripción:
Es el método primario y más confiable. Consiste en consultar las recomendaciones directas del fabricante del equipo.

Fuentes de información:

- **Manuales del fabricante:** Contienen especificaciones detalladas de viscosidad, tipo de aceite (mineral, sintético, con aditivos EP), y cambios recomendados.
- **Placas de identificación del equipo:** Ubicadas en la caja del reductor, proporcionan datos de lubricación, temperatura, RPM, y potencia.

Sistemas digitales del fabricante: Algunos OEMs ofrecen bases de datos en línea donde ingresando el modelo del equipo se obtiene la recomendación exacta.

2. Método de Normas Industriales (AGMA, ISO)

Descripción:
Utiliza estándares internacionales como **AGMA 9005-F16** o **ISO 12925** para seleccionar la viscosidad y tipo de lubricante según condiciones de operación.

Proceso:

- **Clasificar el tipo de engranaje:** Cónicos, helicoidales, sinfín-corona, etc.
- **Determinar la carga, velocidad y temperatura:** Con estos datos, se entra a tablas de AGMA o ISO para obtener la viscosidad ISO VG recomendada.
- **Seleccionar aditivos:** Si hay altas cargas o condiciones extremas, se opta por aceites con aditivos **EP (Extrema Presión)** o **anti-desgaste**.

Ejemplo práctico:
Para una caja de engranajes helicoidales sometida a alta carga y temperatura de operación de 60 °C, AGMA puede recomendar un aceite ISO VG 220 con aditivos EP.

3. Método de Cálculo de Viscosidad por EHL (Elastohidrodinámica)

Descripción:
Es un método más técnico y preciso, basado en cálculos de lubricación elastohidrodinámica (EHL). Se utiliza para aplicaciones críticas o de alta precisión.

Fórmula de Crook y Archard (simplificada):

$$V_g = \frac{1,000,000}{0.1089 \cdot d \cdot n_p \cdot \left(\frac{m_G}{m_G+1}\right)}$$

Donde:

- **Vg** = Viscosidad mínima requerida (cSt) a la temperatura de operación.
- **d** = Diámetro de paso del piñón (pulgadas).
- **np** = Velocidad del piñón (RPM).
- **mG** = Relación de engranaje (dientes del engranaje/dientes del piñón).

Ejemplo práctico:
Si un piñón de 5" opera a 1800 RPM con una relación de engranaje de 4:1, la viscosidad mínima requerida es de **295 cSt** a la temperatura de operación, lo que equivale a un aceite **ISO VG 320**.

4. Método de Ensayos de Laboratorio (Timken, FZG, Falex)

Descripción:
Utiliza ensayos estandarizados para evaluar la capacidad de carga y resistencia al desgaste del lubricante.

Ensayos más comunes:

- **Ensayo Timken OK Load:** Evalúa la capacidad de carga del lubricante bajo condiciones de fricción extrema.
- **Ensayo FZG (Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau):** Determina la capacidad de carga de engranajes bajo condiciones controladas.
- **Ensayo Falex EP:** Mide la resistencia a la presión extrema y al desgaste.

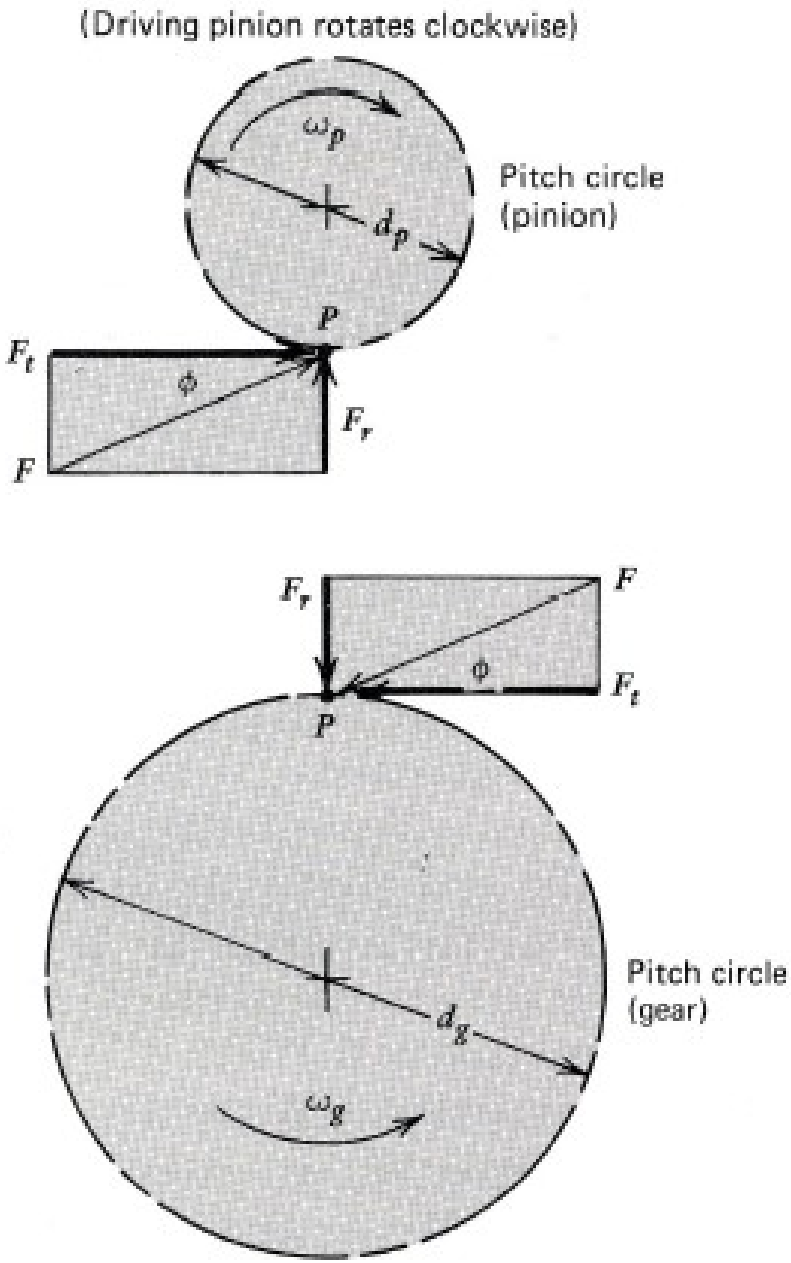
Uso práctico:
Un aceite con un valor FZG > 12 es adecuado para engranajes sometidos a altas cargas y choques.

5. Método de Selección por Tablas de Aplicación

Descripción:

Utiliza tablas simplificadas proporcionadas por fabricantes de lubricantes (como Mobil, Shell, Castrol) que relacionan tipo de engranaje, condiciones de operación y lubricante recomendado.

En las soluciones numéricas de lubricación elastohidrodinámica (EHL) el **parámetro L** (más conocido como *L de Moes*) no es un resultado sino una **coordenada de diseño adimensional**. Su utilidad radica en que permite clasificar el régimen de lubricación y obtener, sin resolver la ecuación completa de Reynolds, el espesor de película adimensional Hc y el coeficiente de fricción μ. A continuación se resume el procedimiento habitual en los códigos EHL actuales.



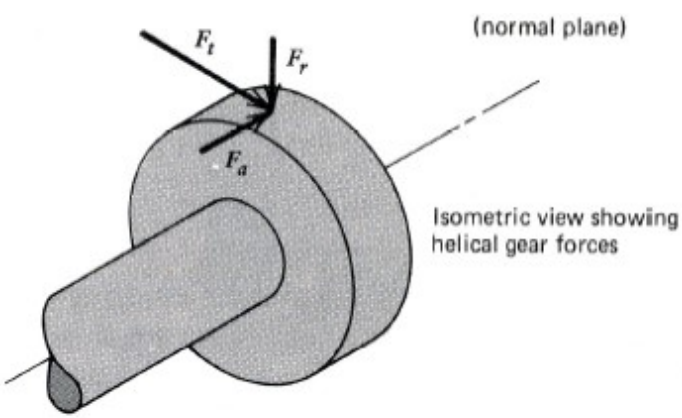
$$F_r = F cos\phi$$

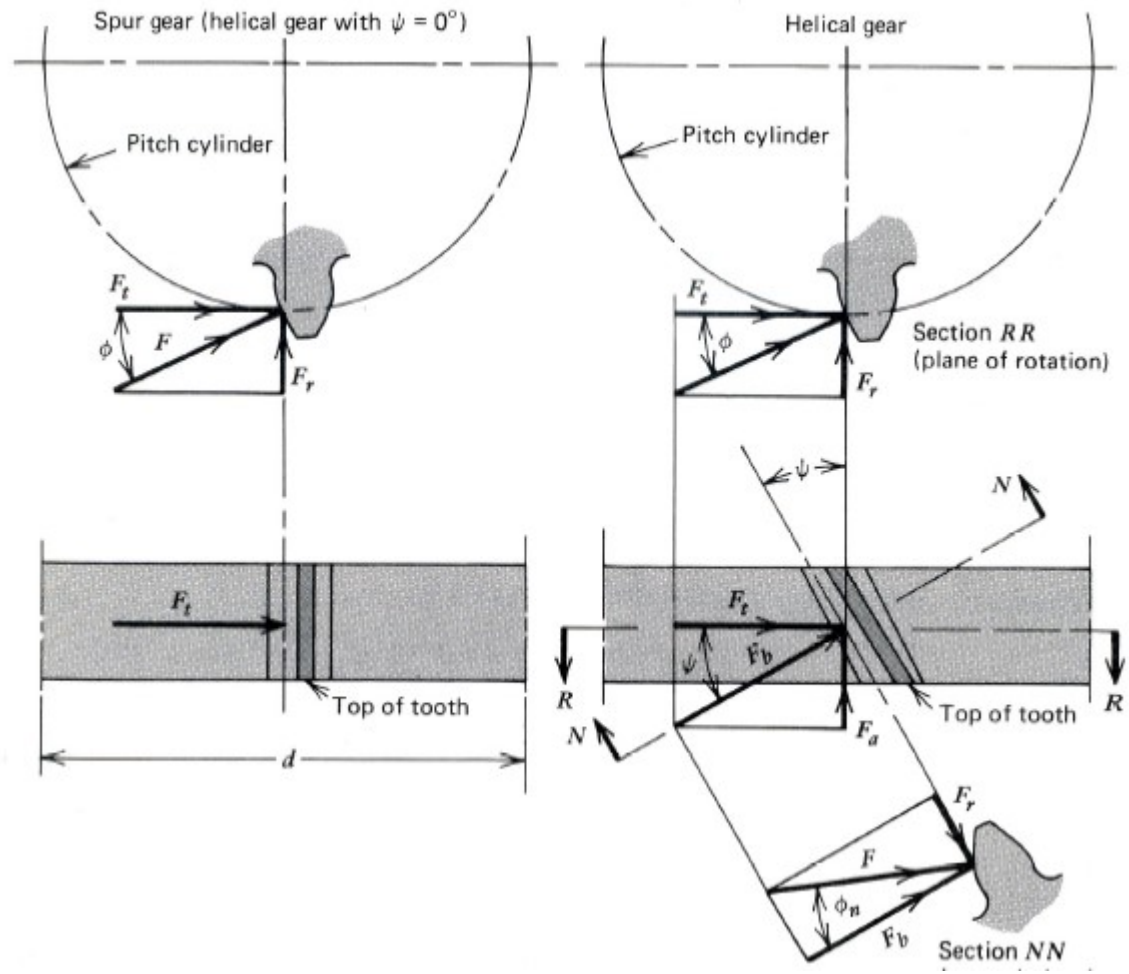
$$F_t = F sen\phi$$

$$T = F_t \cdot \frac{D_0}{2}$$

$$P = T \cdot \omega$$

$$F_r = F_t tan\phi$$
$$F_a = F_t tan\psi$$
$$F_b = \frac{F_t}{cos\psi}$$
$$F = \frac{F_b}{cos\phi_n} = \frac{F_t}{cos\psi cos\phi_n}$$
$$T = F_t \cdot \frac{D_0}{2}$$
$$P = T \cdot \omega$$





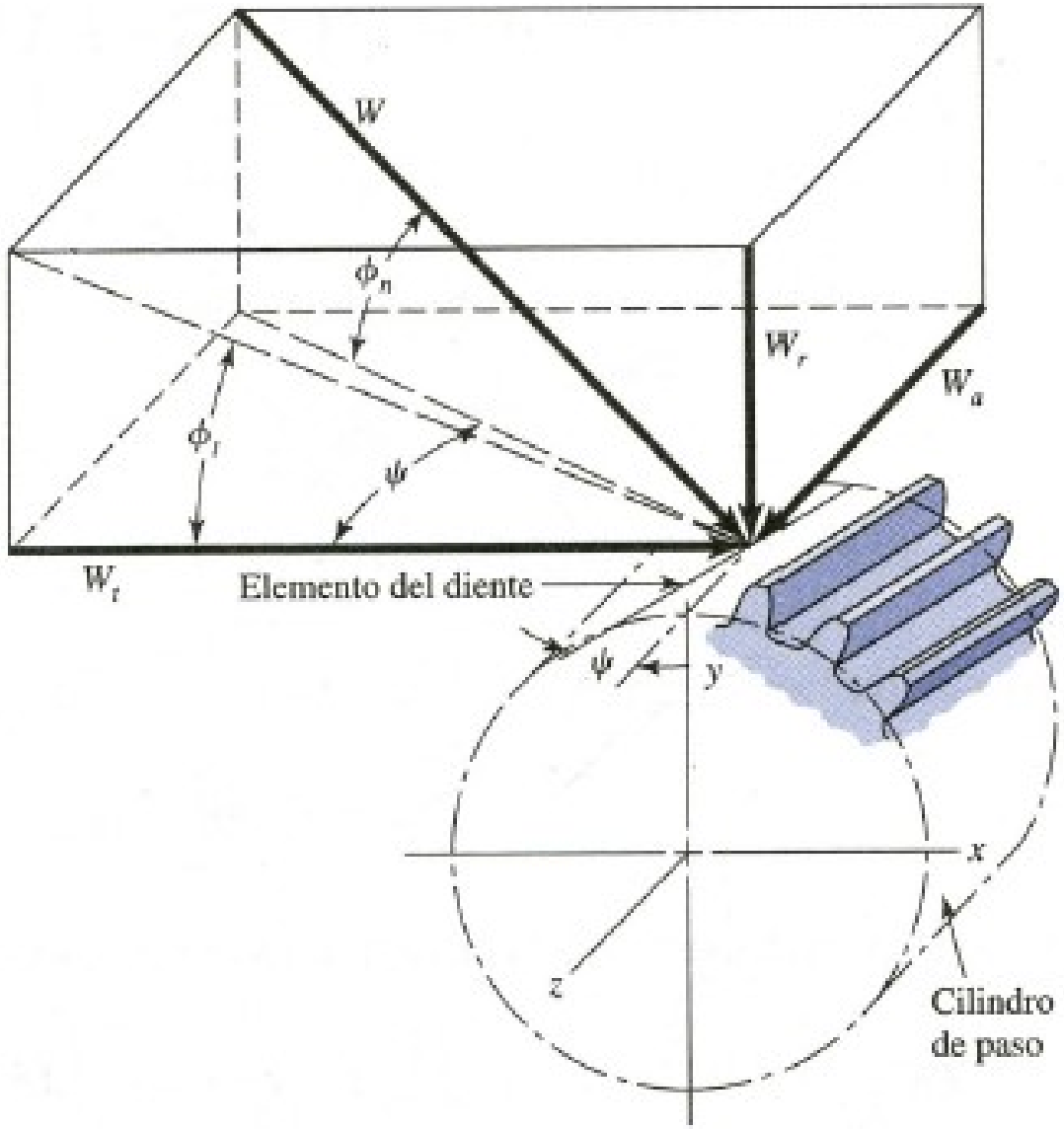
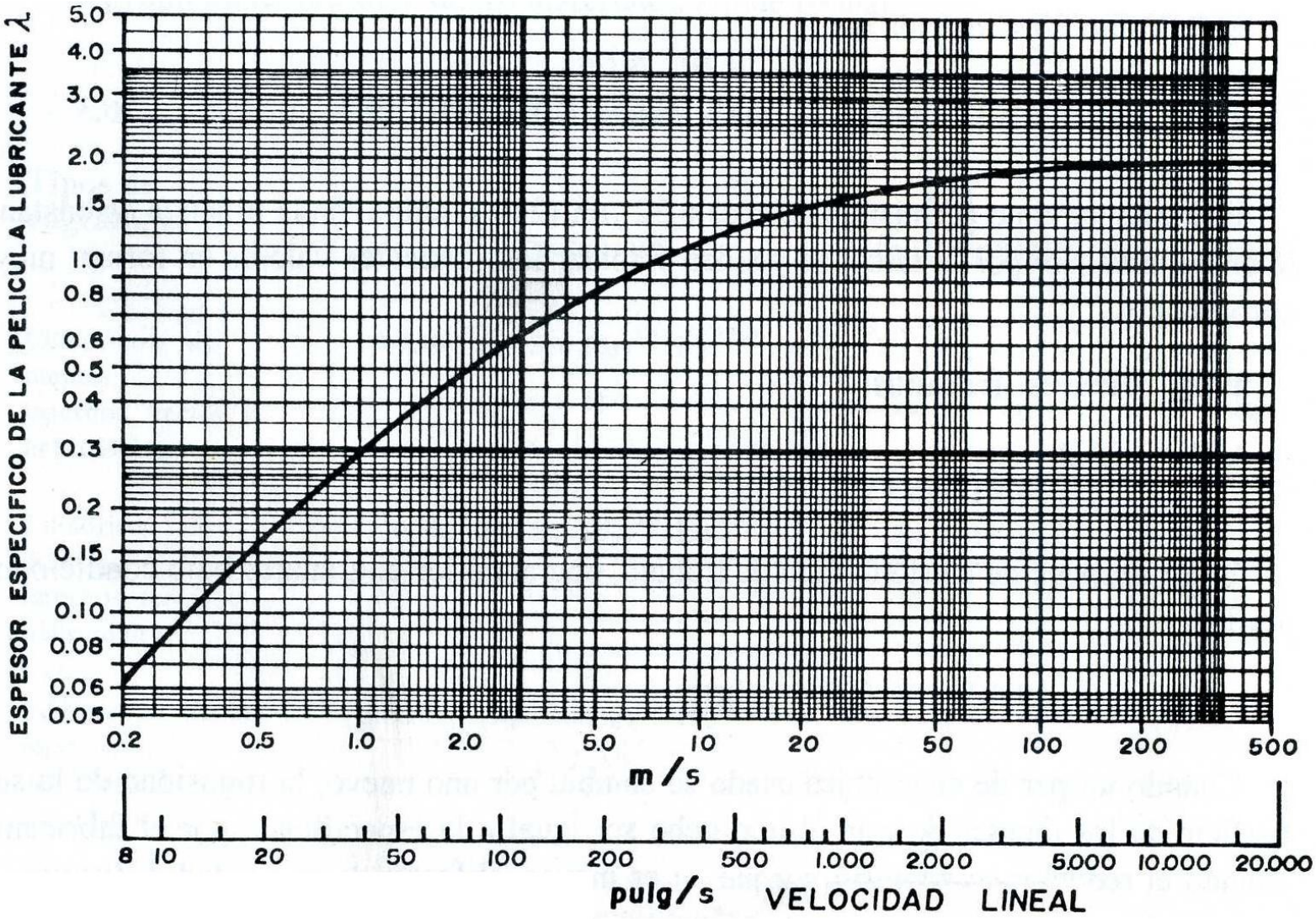


Figura 9.2: Fuerzas producidas en un diente helicoidal


ESPESOR ESPECIFICO DE LA PELICULA LUBRICANTE λ
5.0
4.0
3.0
2.0
1.5
1.0
0.8
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.15
0.10
0.08
0.06
0.05
0.2
0.5
1.0
2.0
5.0
10
20
50
100
200
500
m/s
8
10
20
50
100
200
500
1.000
2.000
5.000
10.000
20.000
pulg/s
VELOCIDAD LINEAL

La metodología basada en estos conceptos ha sido desarrollada por varios autores, entre los cuales destacan Dowson, Townsen y Fowles. Se propone un método má exacto basado en el cálculo del parámetro lubricante L y con él y la temperatura de operación encontrar el lubricante adecuado.

$$L = \frac{h_0^{1,35} W_T^{0,148}}{G n_p}$$

$$h_0 = \lambda \bar{\sigma}$$

Para engranajes el valor de $\bar{\sigma}$ es difícil de medir (engranajes son fabricados por diferentes maestranzas). Se acostumbra a aproximar este valor de acuerdo a:

- Valor inicial: 0,81 μm, (32μin)
- Después de un cierto tiempo de operación normal: 0,408 μm, (16μin)

Cuadro 5.2: Fórmulas necesarias para seleccionar lubricante. A: cilíndrico, externo de dientes rectos y helicoidales, B: idem a A pero internos, C: cónicos, rectos y helicoidales con ejes a 90°

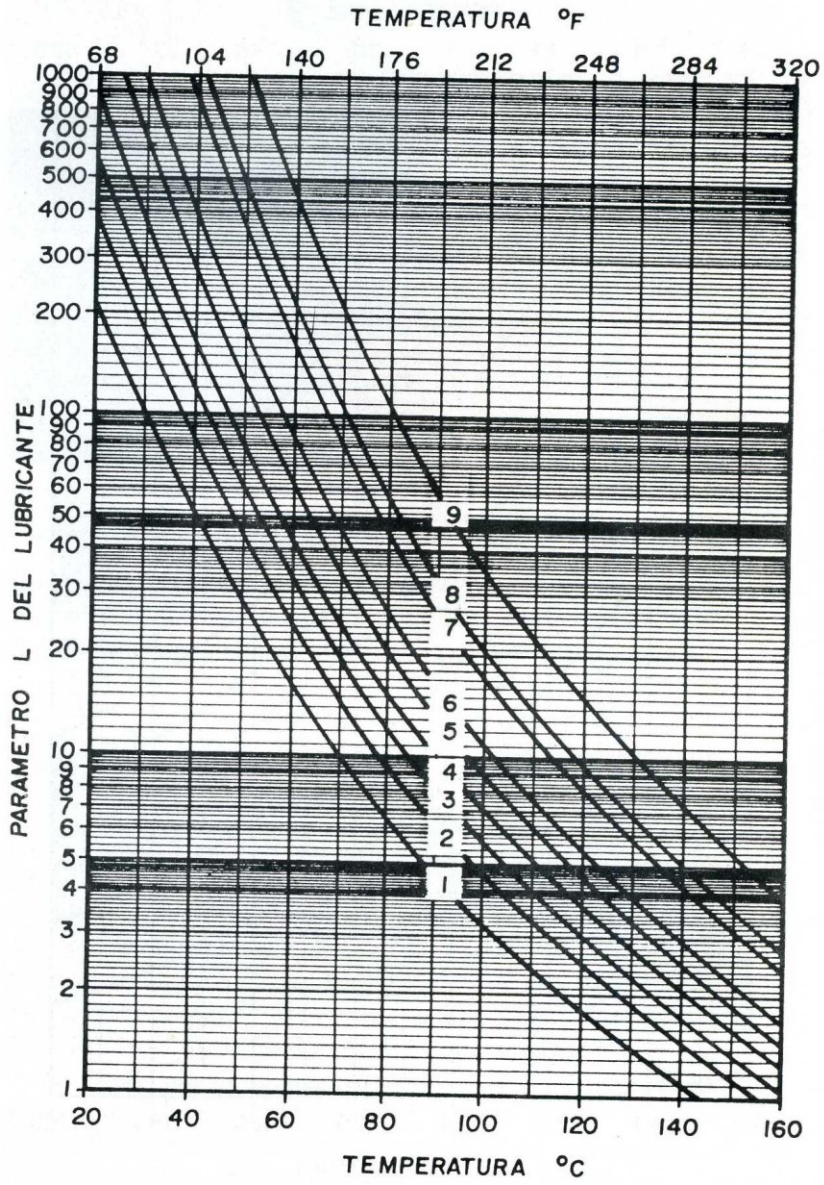
Tipo de engranaje	G	W_T	v
A	$\frac{3{,}4x10^{-4}(rhsen\phi_n)^{1,5}E_D^{0,148}}{(r+1)^2}$	$\frac{T_e(r+1)}{rhbcos\phi_n cos^2\varphi}$	$\frac{2\pi rhn_e}{60(r+1)}$
B	$\frac{3{,}4x10^{-4}(rhsen\phi_n)^{1,5}E_D^{0,148}}{(r-1)^2}$	$\frac{T_e(r-1)}{rhbcos\phi_n cos^2\varphi}$	$\frac{2\pi rhn_e}{60(r-1)}$
C	$\frac{3{,}4x10^{-4}(R_m sen\phi_n)^{1,5}E_D^{0,148}}{(1+r^2)^{0,25}}$	$\frac{T_e}{R_m bcos\phi_n cos^2\varphi_m}$	$\frac{2\pi R_m n_e}{60}$

r	Relación de reducción n_p/n_e ó D_e/D_p ; adimensional
h	distancia entre centros de ejes; m
b	longitud del diente ; m
R_m	radio de paso medio del engranaje; m
n_e	velocidad del engranaje mayor (corona); rpm
n_r	velocidad de la rueda o anillo; rpm
E_D	módulo equivalente de elasticidad
	$E_D = 2[\frac{(1-\mu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\mu_2^2)}{E_2}]^{-1}$
μ_i	módulo de Poisson de ambos materiales
	$\mu_i = \frac{E_i}{2G_i} - 1$
E_i	módulo de elasticidad de cada material
G_i	módulo de corte de cada material

T_e	torque en el engrane $T_e = \frac{KP}{n_e}$
K	constante: 9550 Nm y 63000 lbf-in
P	potencia transmitida; kW (HP)
T_r	torque de la rueda o anillo
ϕ_n	ángulo de presión normal (20°)
φ	ángulo de hélice (dientes rectos $\varphi = 0$) $\varphi = cos^{-1}(a/b)$
a	ancho del diente; m
b	longitud del diente; m
φ_m	ángulo de la espiral para engranajes cónicos

Cuadro 5.3: Valores de módulos de elasticidad y corte

Tipo de material	E MPa	G MPa
Aceros aleados y no aleados	2.07	0.79
Bronce fosforoso	1.24	0.41
Aleaciones de Ni	1.79 - 2.07	0.79
Aleaciones de Cu	1.03 - 1.24	0.44
Aleaciones de Al	0.69 - 0.75	0.26
Aleaciones de Magnesio	0.44	0.16
Hierro fundido	1.03 - 1.51	0.41
Hierro maleable	1.79 - 1.86	0.41


TEMPERATURA °F
68
104
140
176
212
248
284
320
PARAMETRO L DEL LUBRICANTE
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
9
8
7
6
5
4
3
2
1
20
40
60
80
100
120
140
160
TEMPERATURA °C

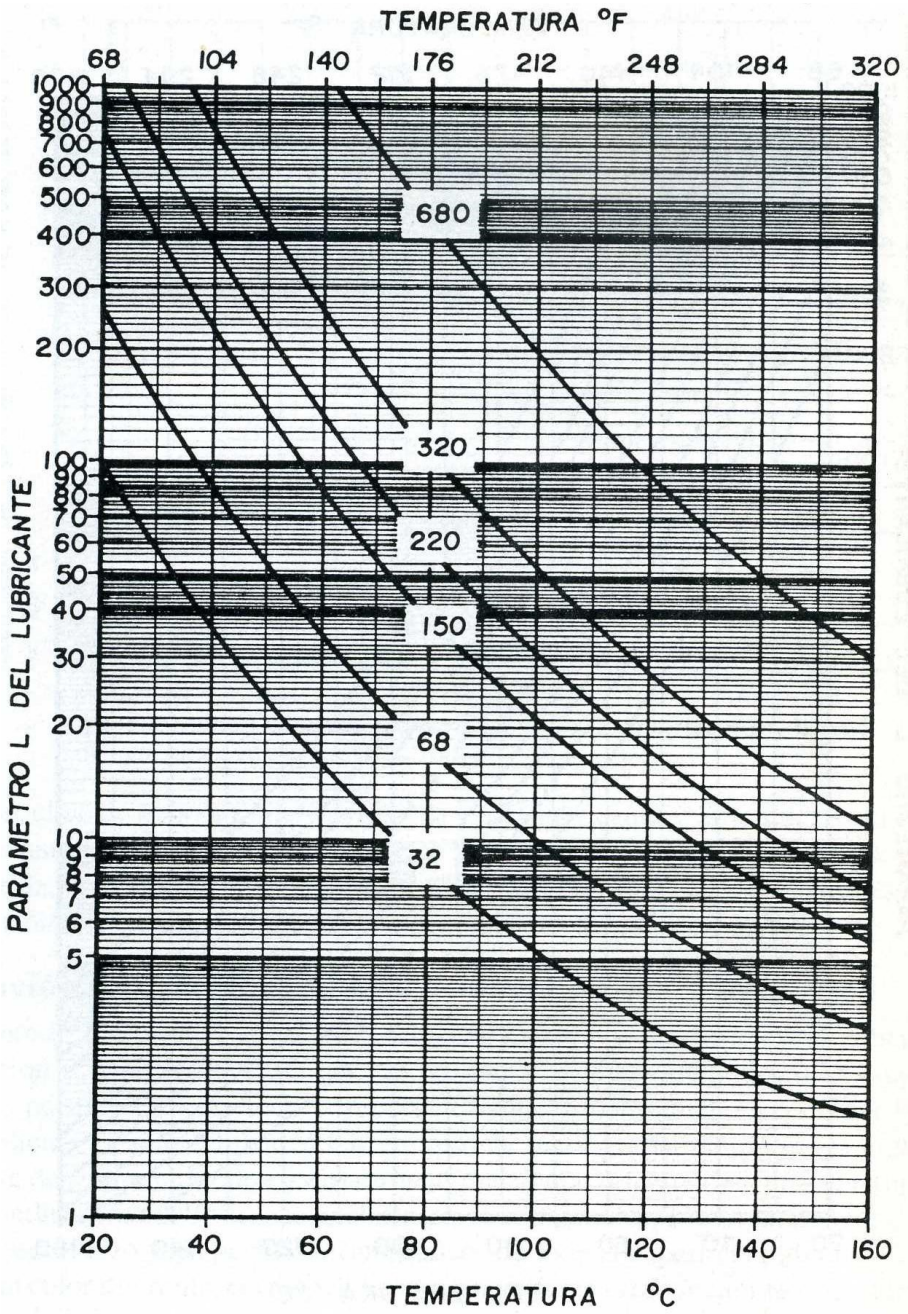
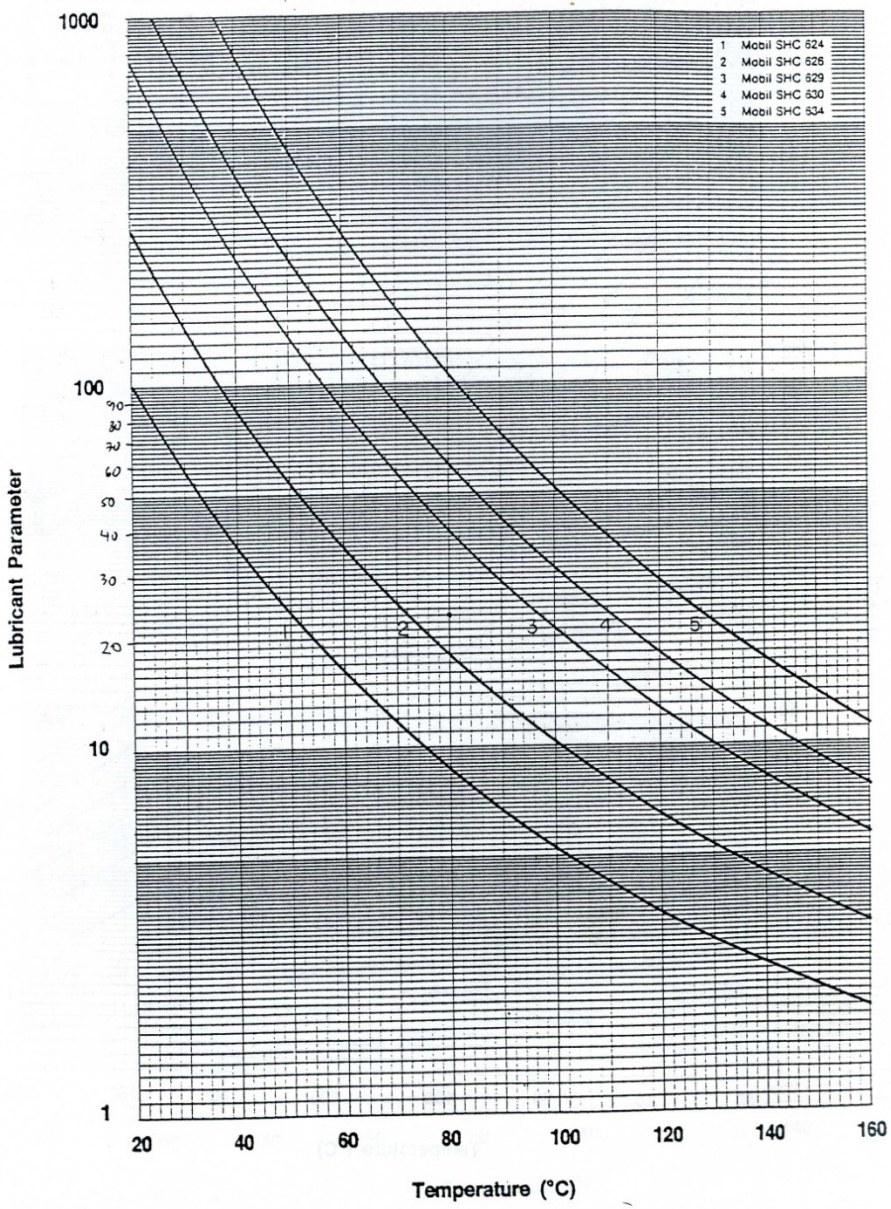

TEMPERATURA °F
68
104
140
176
212
248
284
320
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
9
8
7
6
5
1
680
320
220
150
68
32
PARAMETRO L DEL LUBRICANTE
20
40
60
80
100
120
140
160
TEMPERATURA °C

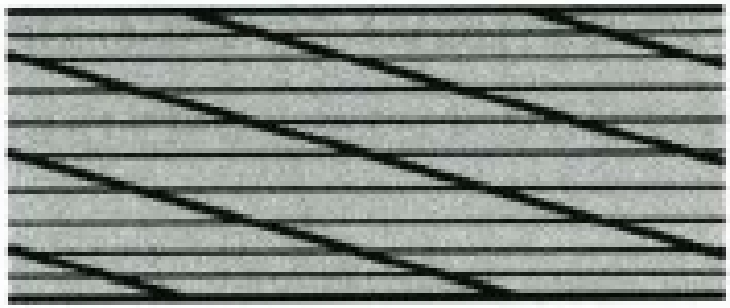
Fig. LP 14 Mobil SHC 600 Series



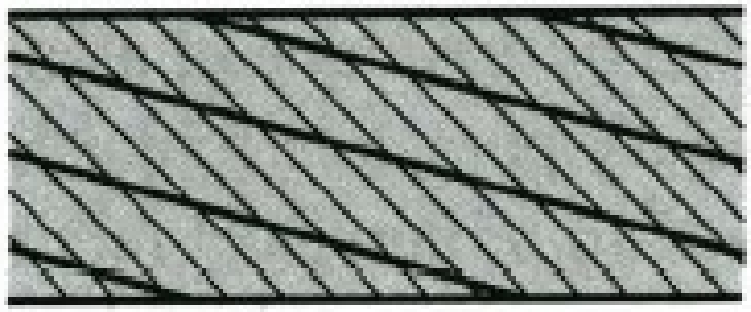
LUBRICACIÓN ELASTOHIDRODINÁMICA

Este equipo permite investigar el espesor y las características de una película lubricante en una esfera.

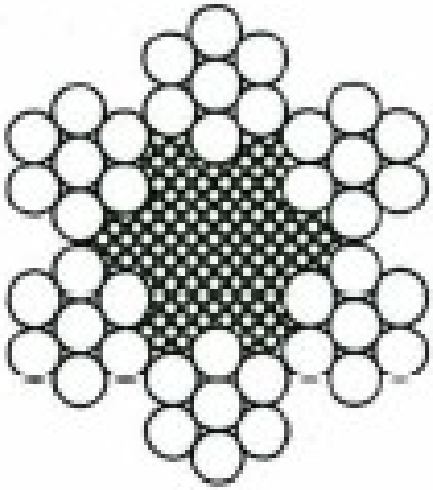
CABLES



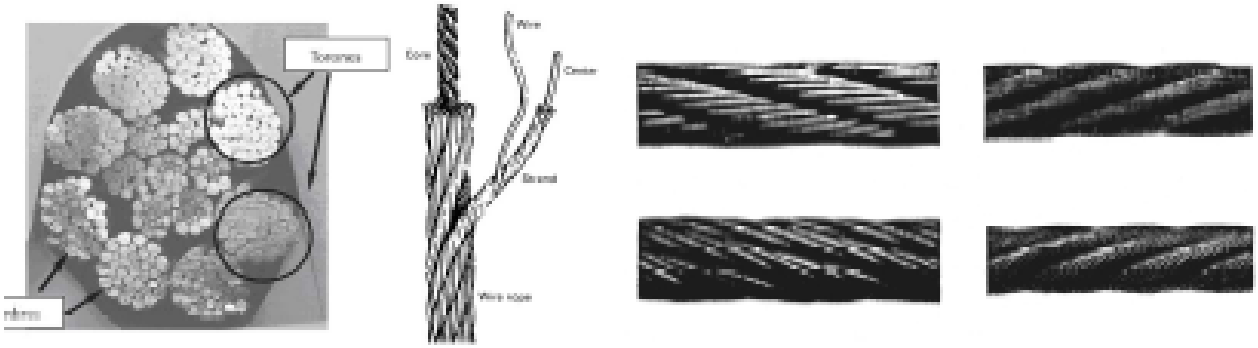
a) Torzal regular



b) Torzal Lang



c) Sección de un cable 6 × 7



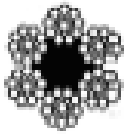
Composición	Hilaturas: de cordones	Hilaturas: de hilos por cordón	Hilaturas: total de hilos	Diámetro nominal del cable (tolerancia admisible ± 5 %)	Diámetro del hilo (mm): mín.	Diámetro del hilo (mm): medio	Diámetro del hilo (mm): máx.	Sección ideal del cable (mm²)	Peso (kg/m) (tolerancia admisible ± 5 %)	Carga de rotura calculada bajo una resistencia del hilo (kg/mm²) de: 150	160	180
Seal-Lay  $6 \times 19 = 114$ hilos + 1 alma textil	6	1 + 9 + 9 = 19	114	8	0,80	0,37	0,65	28,7	0,26	3 450	4 250	4 800
				10	0,95	0,45	0,80	39,9	0,38	5 150	6 350	7 150
				12	1,2	0,55	0,95	57,8	0,55	7 300	9 250	10 400
				14	1,4	0,65	1,1	78,6	0,75	10 150	12 550	14 100
				16	1,6	0,7	1,3	104,5	1,00	13 550	16 700	18 800
				18	1,7	0,8	1,4	125,8	1,18	16 100	19 800	22 250
				20	1,9	0,9	1,6	150,9	1,35	20 750	23 350	28 750
				22	2,2	1,0	1,7	187,7	1,79	24 400	30 000	33 800
				24	2,4	1,1	1,9	231,5	2,20	30 100	37 000	41 650
				26	2,6	1,2	2,0	262,5	2,50	34 100	42 000	47 250
				29	2,8	1,3	2,2	315,8	2,98	40 800	50 200	56 500
				31	3,0	1,4	2,4	369,8	3,51	48 050	59 150	66 550

Figura 10.14: Configuración de un cable de acero de potencia

1. La resistencia a la tracción del mismo.
2. La flexibilidad exigida al cable.
3. La resistencia al desgaste del cable por rozamiento.
4. La resistencia del cable a la acción corrosiva del medio ambiente en que trabaja.

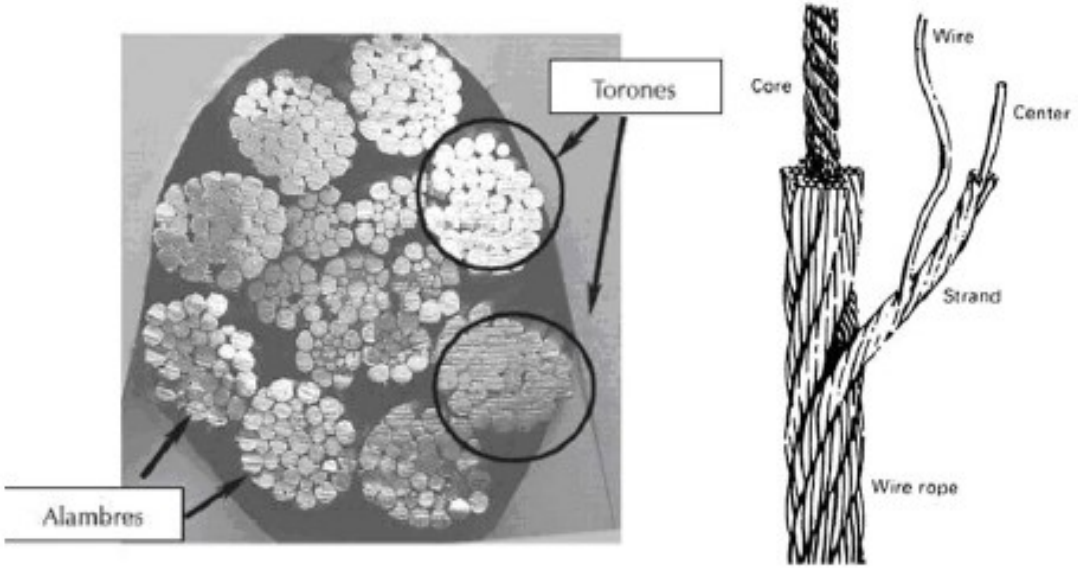


Figura 10.1: Partes de la sección transversal de un cable

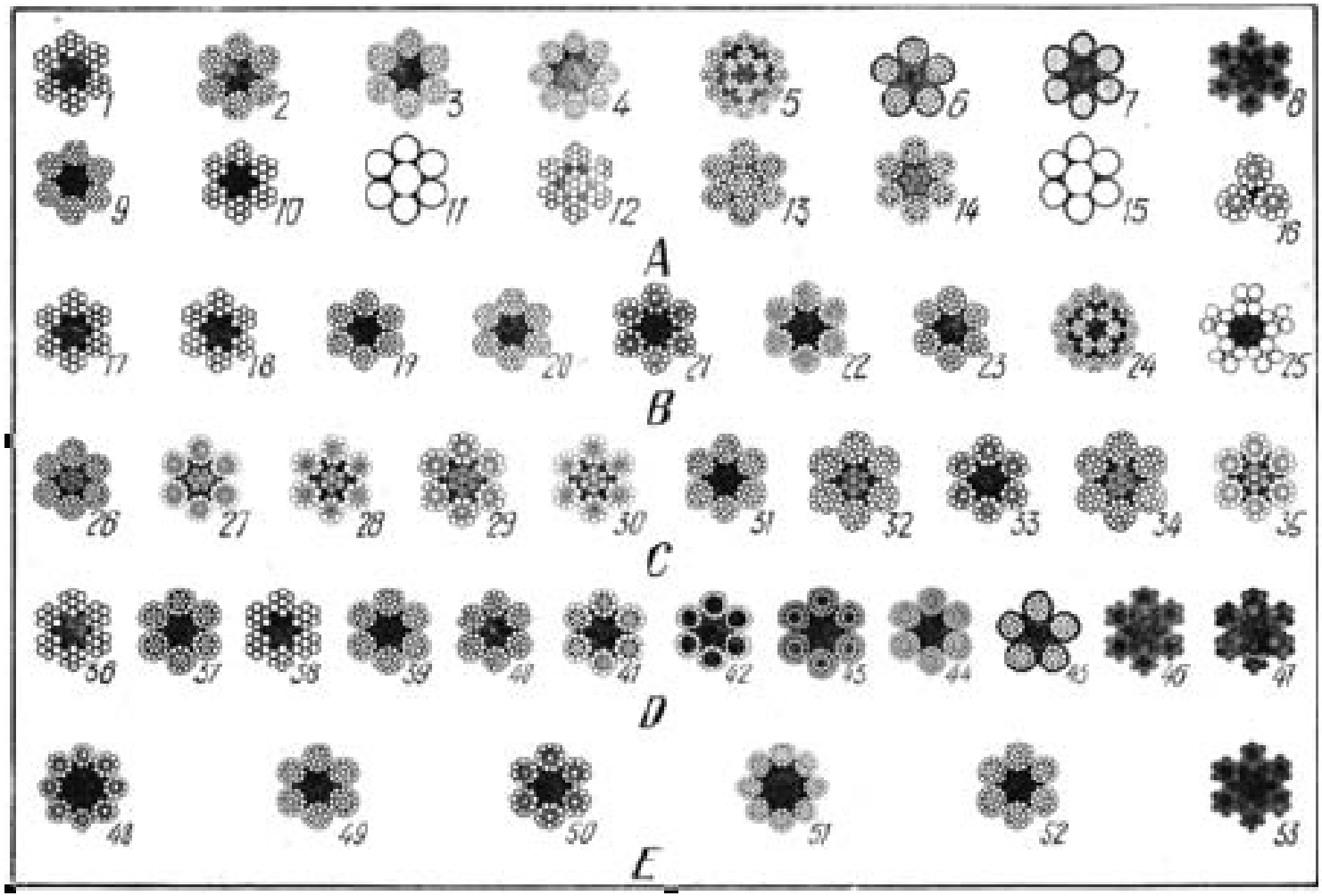


Figura 10.2: Diversos tipos de configuración de cables de acero

$$F_b = \sigma A_m = \frac{E_r d_w A_m}{D}$$

La primera consideración para seleccionar un cable metálico es la carga estática basado F_t en los siguientes puntos:

1. Peso muerto
2. Cargas adicionales por paradas y/o arranques repentinos
3. cargas de impacto
4. fricción en cojinete de polea

Cable	Peso por pie, lb	Diámetro mínimo de la polea, pulg	Tamaños estándares d, pulg	Material	Tamaño de alambres exteriores	Módulo de elasticidad,* Mpsi	Resistencia,† kpsi
De arrastre 6 × 9	$1.50d^2$	$42d$	$\frac{1}{4} - 1\frac{1}{2}$	Acero monitor	$d/9$	14	100
				Acero de arado	$d/9$	14	88
				Acero dulce de arado	$d/9$	14	76
De izar estándar 6 × 19	$1.60d^2$	$26d$-$34d$	$\frac{1}{4} - 2\frac{1}{4}$	Acero monitor	$d/13$-$d/16$	12	106
				Acero de arado	$d/13$-$d/16$	12	93
				Acero dulce de arado	$d/13$-$d/16$	12	80
Flexible especial 6 × 37	$1.55d^2$	$18d$	$\frac{1}{4} - 3\frac{1}{4}$	Acero monitor	$d/22$	11	100
				Acero de arado	$d/22$	11	88
Extra-flexible 8 × 19	$1.45d^2$	$21d$-$26d$	$\frac{1}{4} - 1\frac{1}{4}$	Acero monitor	$d/15$-$d/19$	10	92
				Acero de arado	$d/15$-$d/19$	10	80
Aeronáutico 7 × 7	$1.70d^2$	—	$\frac{1}{16} - \frac{1}{2}$	Acero resistente a la corrosión	—	—	124
				Acero al carbono	—	—	124
Aeronáutico 7 × 9	$1.75d^2$	—	$\frac{1}{8} - 1\frac{1}{2}$	Acero resistente a la corrosión	—	—	135
				Acero al carbono	—	—	143
Aeronáutico 19-alambres	$2.15d^2$	—	$\frac{1}{16} - \frac{1}{8}$	Acero resistente a la corrosión	—	—	165
				Acero al carbono	—	—	165

Figura 10.3: Características de cables en la literatura

$$n = \frac{F_u}{F_t}$$

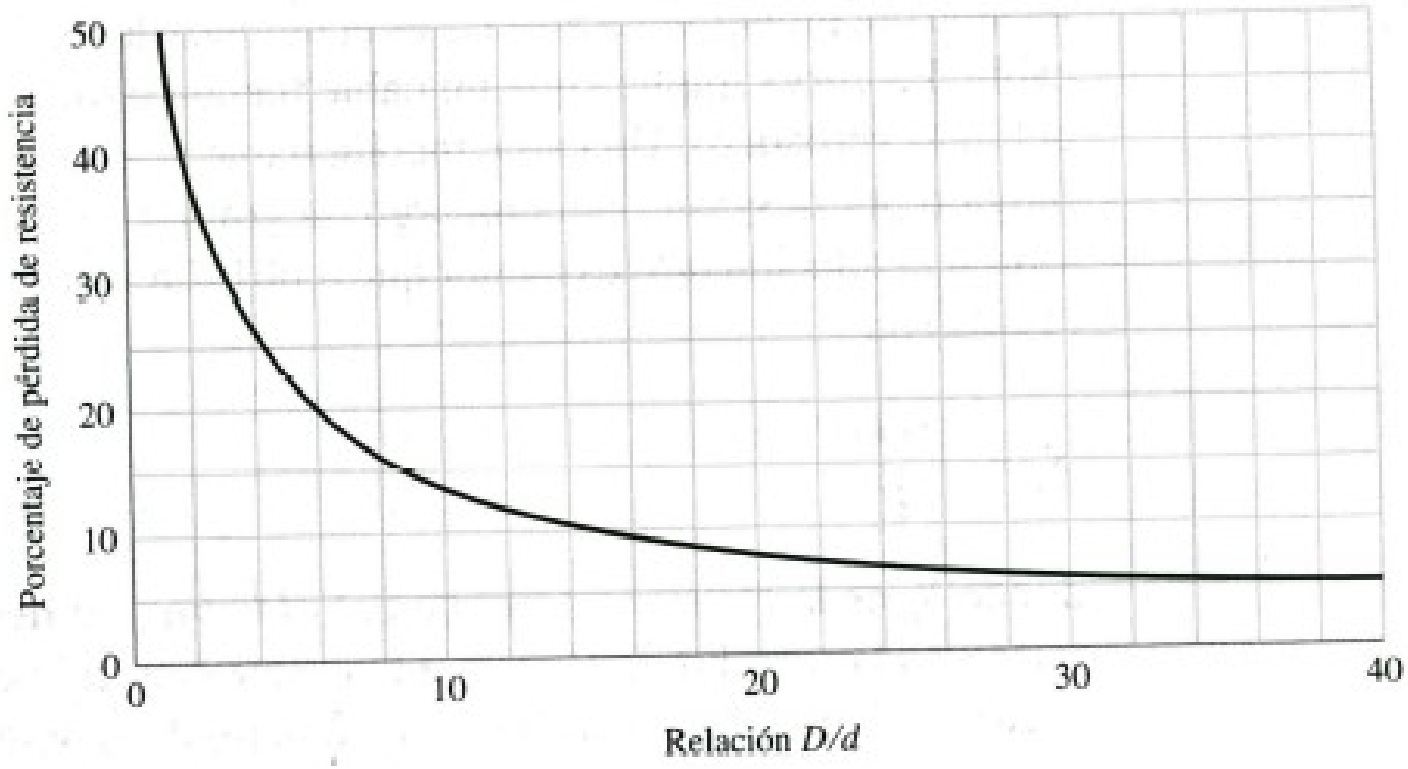


Figura 10.4: Porcentaje de pérdida de resistencia versus D/d

Cables de sujeción	3.2
Tirantes	3.5
Tiros de mina, ft	
Hasta 500	8.0
1 000-2 000	7.0
2 000-3 000	6.0
Más de 3 000	5.0
Malacates	5.0
Arrastre	6.0
Grúas y grúas de brazo retráctil	6.0
Malacates eléctricos	7.0
Elevadores manuales	5.0
Elevadores privados	7.5
Elevadores domésticos para servicio	4.5
Elevadores de granos	7.5

Elevadores de pasajeros, ft/min:	
50	7.60
300	9.20
800	11.25
1 200	11.80
1 500	11.90
Elevadores de carga, ft/min:	
50	6.65
300	8.20
800	10.00
1 200	10.50
1 500	10.55
Elevadores domésticos automáticos para servicio, ft/min:	
50	4.8
300	6.6
500	8.0

Figura 10.5: Coeficientes de seguridad para distintas aplicaciones de cables de acero

$$p = \frac{2F}{dD}$$

Cable	Material				
	Madera[a]	Fundición de hierro[b]	Fundición de acero[c]	Fundiciones de hierro enfriadas[d]	Acero al manganeso[e]
Torzal regular:					
6 × 7	150	300	550	650	1 470
6 × 19	250	480	900	1 100	2 400
6 × 37	300	585	1 075	1 325	3 000
8 × 19	350	680	1 260	1 550	3 500
Torzal Lang:					
6 × 7	165	350	600	715	1 650
6 × 19	275	550	1 000	1 210	2 750
6 × 37	330	660	1 180	1 450	3 300

Figura 10.6: Diversos tipos de material usados en poleas para cables de acero. Presiones admisibles en *psi*

$$S_u = \frac{2000F}{dD}$$

$$p = S_u < 0{,}001$$

$$F_f = \frac{(p/S_u)S_u dD}{2}$$

$$n_f = \frac{F_f - F_b}{F_t}$$

F_f es la resistencia a la flexión, F_t fuerza de trabajo. Una guía de resistencia última de cables es:

Acero de arado mejorado $240 < S_u < 280kpsi$

Acero de arado $210 < S_u < 340kpsi$

Acero de arado dulce $180 < S_u < 210kpsi$

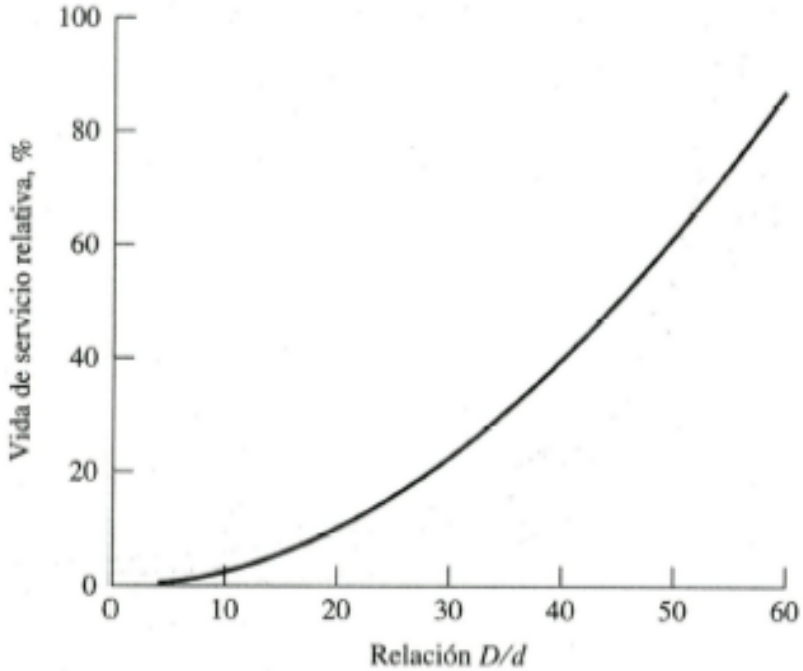


Figura 10.7: Relación entre la vida en servicio relativa y la relación D/d

Cable de acero	Peso por pie w, lbf/ft	Peso por pie incluyendo núcleo w, lbf/ft	Diámetro mínimo de polea D, pulg	Diámetro óptimo de polea D, pulg	Diámetro de alambres d_w, pulg	Área de metal A_m, pulg^2	Módulo de Young del cable E_c, psi
6×7	$1.52d^2$		$42d$	$72d$	$0.111d$	$0.38d^2$	13×10^6
6×19	$1.60d^2$	$1.76d^2$	$30d$	$45d$	$0.067d$	$0.40d^2$	12×10^6
6×37	$1.55d^2$	$1.71d^2$	$18d$	$27d$	$0.048d$	$0.40d^2$	12×10^6

Figura 10.8: Algunas características mecánicas clásicas de un cable de acero

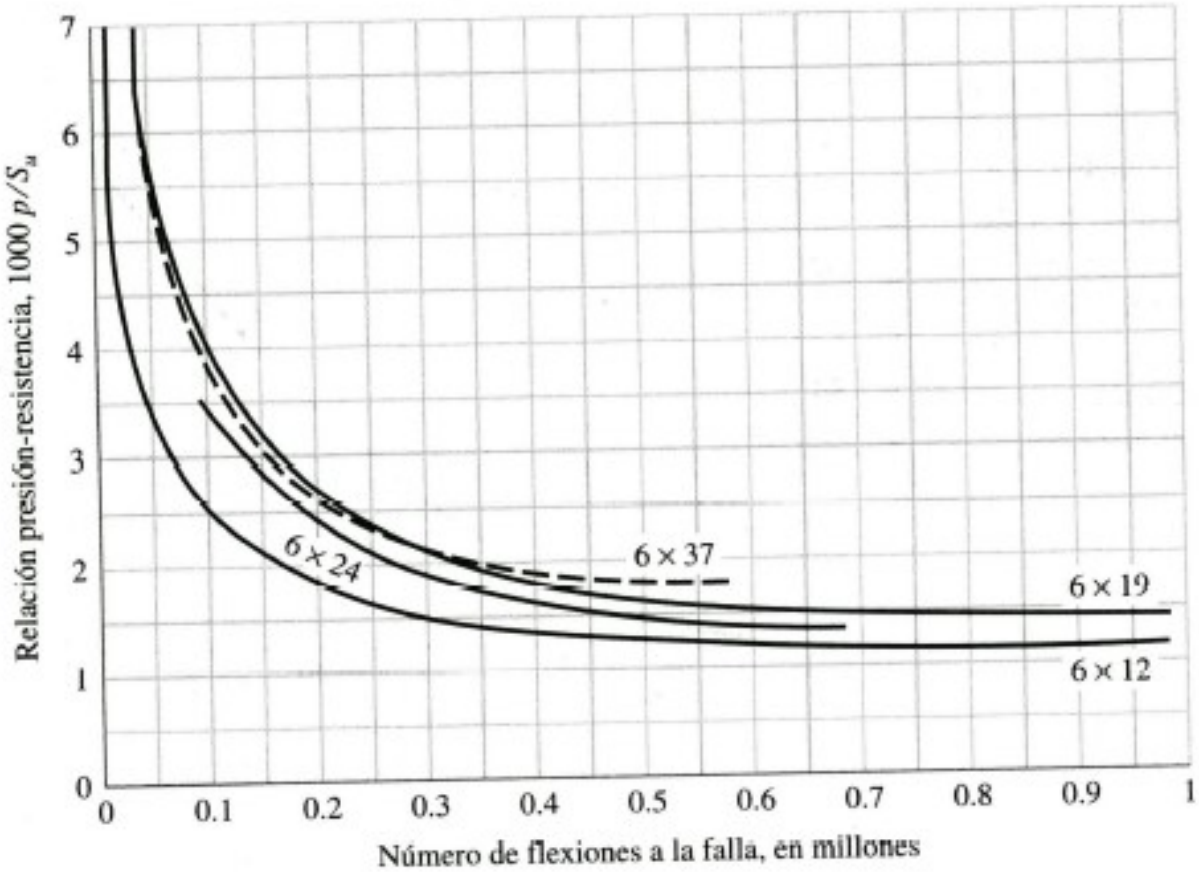


Figura 10.9: Relación entre la presión cable-polea y el número de flexiones

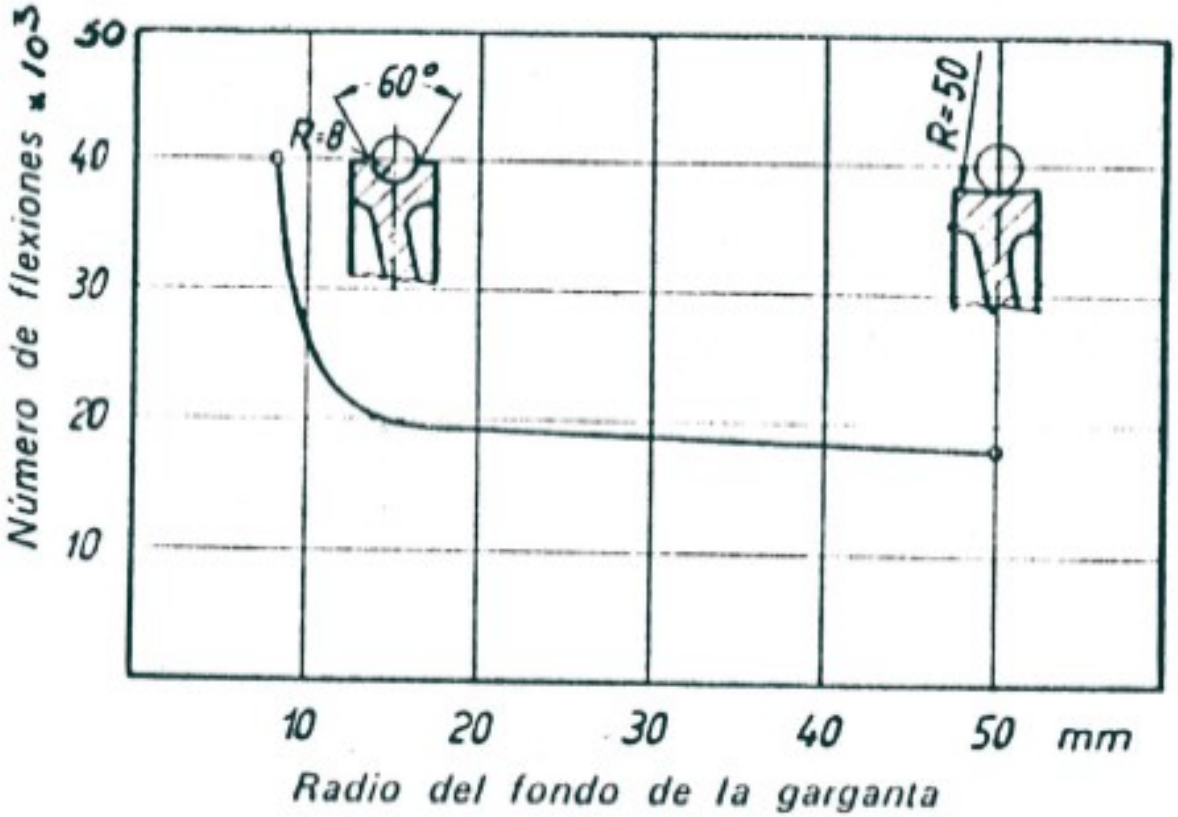


Figura 10.11: Número de flexiones recomendada versus el radio de la garganta en la ranura de la polea

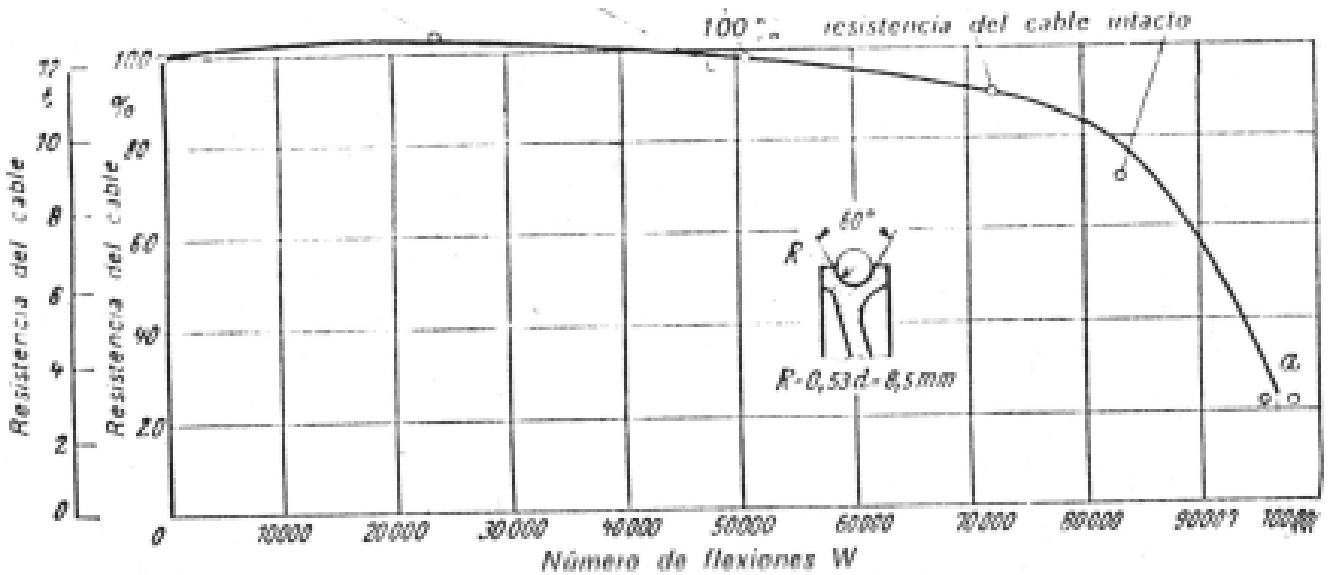


Figura 10.12: Variación de la resistencia del cable en función del número de flexiones

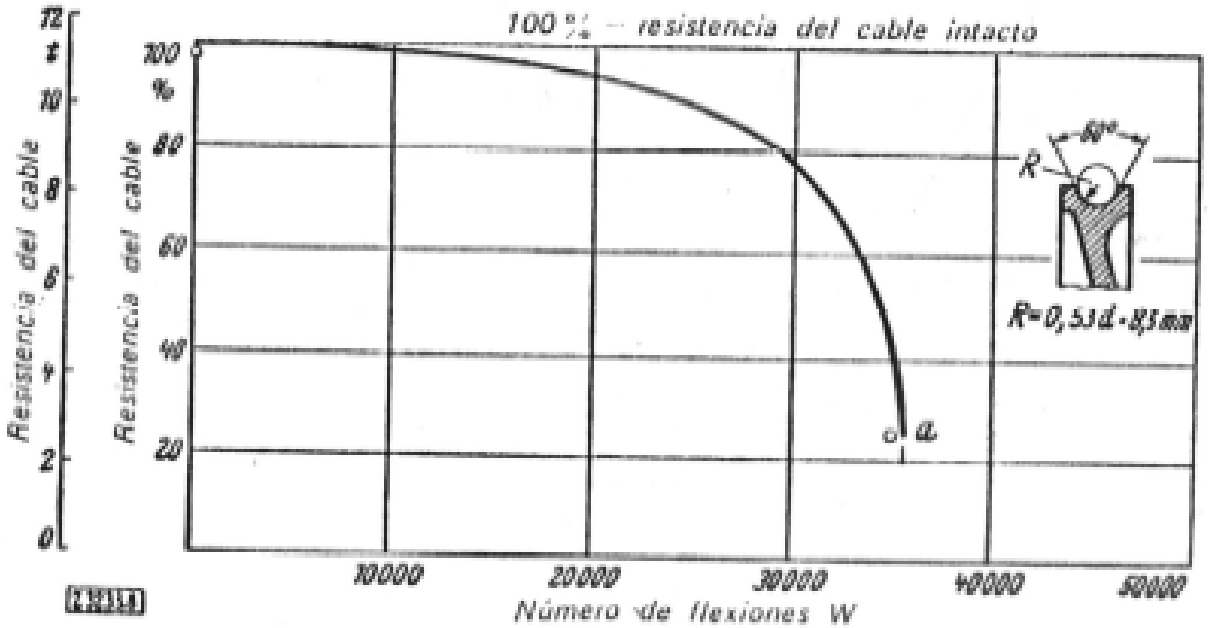


Figura 10.13: Variación de la resistencia del cable en función del número de flexiones para diferentes condiciones geométricos de la polea

El coeficiente de seguridad primitivo, en la resistencia a la tracción (aplicando los datos de la tabla 23)	Estructura de los cables			
	De seis haces, a 19 alambres cada uno $6 \times 19 = 114$ y un alma vegetal		De seis haces, a 37 alambres cada uno $6 \times 37 = 222$ y un alma vegetal	
	torsión cruzada	torsión uniforme	torsión cruzada	torsión uniforme
	El número máximo admisible de alambres rotos en un paso, cuando corresponde el cambio del cable			
Hasta 6	12	6	22	11
más de 6	16	8	30	15
14 — 16	22	11	35	17
más de 16	24	12	38	

Figura 10.16: Recomendaciones para el número máximo de alambres cortados que indican si un alambre debe o no ser cambiado

Cómo se lubrican los cables de acero

Objetivos:

- Reducir la fricción interna entre alambres o entre el cable y el ducto.
- Proteger contra la corrosión (humedad, polvo de mina, sal, ácidos).
- Facilitar la instalación (menor tensión de tracción).
- Extender la vida útil.

METODOS Y TIPOS DE LUBRICANTES

Método	Descripción breve	Lubricante típico	Ventajas clave
Manual (brocha/mano)	Se unta o "pinta" el lubricante sobre la superficie antes o durante el tendido.	Grasas semifluidas, petrolato, gel	Fácil, barato
Vertido ("pour")	Se vierte lubricante líquido en el ducto o sobre el cable.	Polímeros líquidos, aceites sintéticos	Buena cobertura en tramos rectos
Spray / nebulizado	Pulverización con botella manual o equipo a presión.	Lubricantes de película fina (tipo Polywater)	Uniforme, ideal para ductos pequeños
Bomba portátil	Equipo motorizado inyecta lubricante al ducto mientras se tira del cable.	Emulsiones acuosas, geles	Constante, menos esfuerzo físico
Pre-lubricación ducto	Se lubrica el interior del ducto antes del tendido (bolsas FEP, esponjas).	Gel o espuma de alta adherencia	Lubrica curvas y tramos lejanos
Inmersión	El cable se sumerge en un baño de lubricante.	Aceite + anticorrosivo	Muy penetrante, usado en fábrica
Sistema automático WRL	Máquina con anillo sellador que fuerza lubricante bajo presión al pasar el cable.	Grasas EP2, aceites con aditivos mineros	Penetra al núcleo, hasta 90 % menos tiempo

Aplicaciones industriales y minería pesada

Sector / máquina	Tipo de cable	Técnica principal recomendada	Producto ejemplo (indicativo)	Observaciones mina / cantera pesada
Dragas y shovels	Wire rope 40–165 mm	Sistema automático WRL (Viper MKII Maxi)	Grasas EP2 + anticorrosivo marino	Arena, agua salada, altas cargas
Grúas puente (overhead crane)	Wire rope 12–52 mm	Spray + sistema WRL portátil	Petrolato + grasa complejo aluminio	Polvo fino, choques térmicos
Tendido de alimentación HV	Cable XLPE 1×500 mm²	Pre-lubricación ducto + bomba de membrana	Gel base agua biodegradable	Tendidos > 1 km, curvas 90°
Cable de arrastre (dragline)	Wire rope 60–90 mm	Inmersión + sistema WRL	Aceite sintético + MoS_2	Solicitaciones cíclicas extremas
Cabrestantes mineros (winders)	Wire rope > 50 mm	WRL + grasa de fibra rellena	Mining Grease EP2 EAL (LanoPro)	Ambiente húmedo y polvoriento
Puentes colgantes / ziplines	Cable de acero trenzado	Brocha + recubrimiento espesor	Recubrimiento bituminoso	Expuesto a intemperie
Elevadores de mina	Wire rope 20–40 mm	Sistema WRL + aceite penetrante	Aceite ISO VG 68 + anticorrosivo	Altas profundidades, rocío ácido

Buenas prácticas en minería pesada:

- **Limpiar primero**: removedor de grasa vieja + chorro de vapor o aire a 6 bar.

- **Secar y lubricar inmediatamente** para evitar flash-corrosión.

- **Combinar penetrante + recubrimiento**: primero aceite penetrante al núcleo, luego grasa protectora superficial.

- **Frecuencia**: cada 250 horas de servicio o tras cada descarga de barco/dragado, según polución ambiental.

- **Documentar consumo**: programas CMMS permiten correlacionar m^3 extraídos con litros de lubricante y vida útil real de cada cable.

Lubricante ideal para cables de acero en minería pesada

(“wire ropes” de dragas, shovels, grúas, malacates, etc.)

Especificaciones críticas que debe cumplir

- **Penetración total al núcleo**: baja viscosidad inicial + solvente evaporante.
- **Película antidesgaste y EP**: aditivos MoS_2, grafito, Teflon o polímeros de alta carga.
- **Barrera anticorrosiva**: sulfonatos de calcio o inhibidores de oxidación.
- **Resistencia al agua y sal**: especificación ASTM D-4049 “water wash-off” < 5 %.
- **Rango térmico**: –30 °C (altiplano) hasta 120 °C (superficie de tambor).
- **Adherencia extrema**: gel o grasa semifluida que no se lave con agua a presión.

Algunos ejemplos de lubricantes usados en la minería.

Tipo de lubricante	Formulación	Aplicaciones típicas	Ejemplos comerciales*	Ventajas en mina
Grasa semifluida "coating"	Aceite mineral + espesante complejo + MoS_2	Superficie exterior de cables expuestos a polvo fino y sal	Wirelife Almasol Coating Grease, RS Clare ClareGuard Build	Pelicula gruesa, sella humedad, 6–12 meses de vida
Lubricante penetrante	Aceite sintético PAO + solvente evaporante	Interior del cable (alma y torones) en dragas y shovels	Wirelife Monolec Penetrant L, LE Low-Tox	Penetra al núcleo, expulsa agua, reduce fatiga interna
Lubricante marino biodegradable	Éster vegetal + EP + anticorrosivos	Faenas marítimas o cerca de cursos de agua	JAX Bio-Guard, Earthwise EAL 3353	Cumple VGP/EPA, baja toxicidad acuática
Spray de película seca	PTFE + ceras sintéticas	Mantenimiento rápido en cables de grúas portátiles o en altura	WIRE ROPE HD Spray	Aplicación sin grúa auxiliar, no gotea

*: marcas referenciales (como ejemplos)

En el contexto de **cadenas o lubricantes**, el **PTFE** (teflón) se usa como aditivo sólido para reducir el desgaste y la fricción, formando una película seca que protege las superficies metálicas.

Datos recopilados de la web:

Proceso recomendado para mina a cielo abierto

- **Limpieza**: removedor biodegradable + chorro de aire a 6 bar para quitar polvo de cuarzo.
- **Penetración**: aplicar lubricante penetrante con sistema WRL (Viper MK II) a 70 bar; asegurar que fluya desde el extremo opuesto.
- **Recubrimiento**: una vez seco, recubrir con grasa semifluida mediante calzo de fieltro giratorio.
- **Frecuencia**: cada 250 h de servicio o tras cada turno de dragado, lo que ocurra primero.
- **Inspección**: medir viscosidad residual y espesor de película; si cae < 0,05 mm, reprogramar.

Resumen rápido – "¿cuál elijo en mi faena?"

• **Ambiente seco y polvoriento**: grasa semifluida tipo Wirelife Almasol Coating.

• **Ambiente húmedo/salino (playa de relaves, draga flotante)**: penetrante + recubrimiento biodegradable Earthwise EAL.

• **Turnos 24/7 y altas cargas**: combinación penetrante LE Monolec + grasa MoS_2 (Ultraplex Moly Plus) para doble protección.

Con esta combinación se han reportado extensiones de vida de cable de 40–60 % y reducciones de 25 % en costos de mantenimiento en shovels de 400 t de minería de cobre en Atacama

Ejemplo comercial

El producto "Penetrante LE Monolec" se refiere a un lubricante penetrante de la marca Lubrication Engineers (LE), específicamente el Wirelife Monolec Penetrating Lubricant (2001). Este producto está diseñado para penetrar profundamente en cables de acero, tanto en movimiento como estacionarios, así como en cadenas. También es eficaz como lubricante penetrante en diversas aplicaciones industriales.

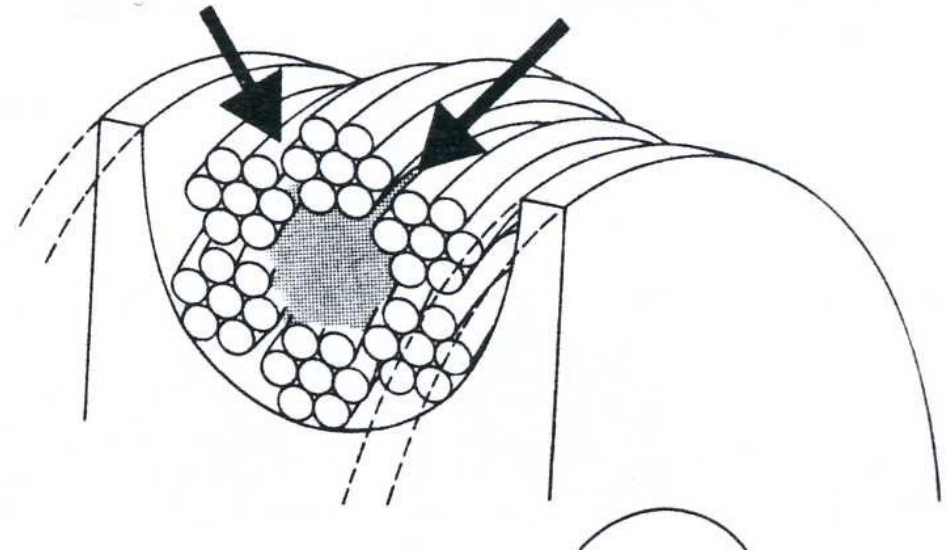
Características principales:

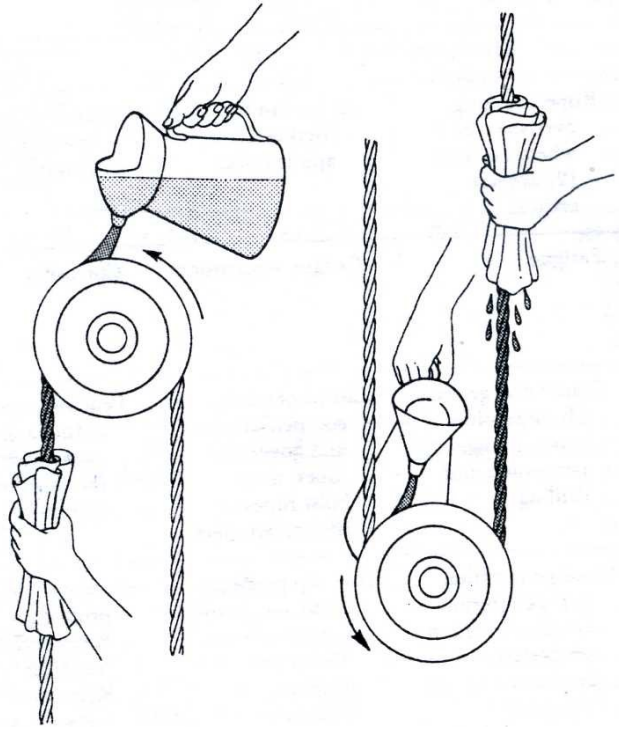
- **Penetración profunda:**
  - Contiene un disolvente de petróleo que facilita su penetración en cables y cadenas, llegando hasta el núcleo.
- **Protección contra la corrosión:**
  - Ofrece una excelente resistencia a la corrosión, protegiendo los componentes metálicos.
- **Lubricación:**
  - Lubrica cada hebra de los cables y los componentes de las cadenas, reduciendo la fricción y el desgaste.
- **Reducción de fricción y desgaste:**
  - El aditivo Monolec® de LE crea una película lubricante molecular que reduce la fricción y el desgaste.
- **Aplicaciones:**
  - Ideal para cables de acero en condiciones exigentes, cadenas, aplicaciones marinas, minería y construcción, y almacenamiento de equipos.
- **Presentación:**
  - Disponible a granel o en aerosol.

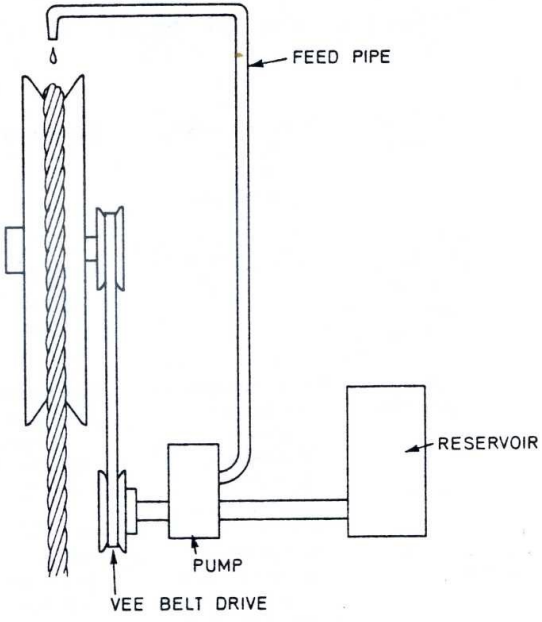
En resumen, el Penetrante LE Monolec es un lubricante de alta calidad que penetra profundamente, protege contra la corrosión y reduce la fricción y el desgaste en una amplia gama de aplicaciones industriales.

¿Qué hay que lubricar?

- **Interior (alma y torones)** → evita fatiga y desgaste interno.
- **Exterior** → protege contra corrosión, polvo y UV.







Drip lubrication

Dos familias de lubricantes

Familia	Función	Formulación típica	Dónde se usa
Penetrante	Llega al núcleo, baja fricción interna	Aceite sintético PAO + solvente evaporable + aditivos EP (MoS_2)	Dragas, shovels, grúas de 100 t
Recubrimiento / sellador	Película gruesa que sella el exterior	Grasa semifluida complejo aluminio-calcio + inhibidores de corrosión	Cables expuestos a sal, polvo, lluvia ácida

Criterios de selección

Criterio	¿Qué mirar?	Valores objetivo
Carga / presión	Ensayo 4-bolas EP (IP 239)	≥ 800 kg
Corrosión ambiental	Spray de niebla salina (ASTM B117)	≥ 500 h sin oxido
Rango térmico	Punto de goteo / punto de fraguado	–30 °C … +120 °C
Lavado con agua	ASTM D-4049	Pérdida de masa < 5 %
Biodegradabilidad	OECD 301B	> 60 % en 28 dias (minas costeras)
Facilidad de aplicación	Viscosidad a 40 °C	300–2000 cSt para WRL

¿Que es OECD 301B ?

- **Mide la cantidad de CO_2 producida** por un material cuando es metabolizado por microorganismos durante **28 días** en condiciones aeróbicas.

- Si el material se considera **"fácilmente biodegradable"**, debe alcanzar **≥ 60 % de conversión a CO_2** en ese período, incluyendo una **ventana de 10 días** donde el 60 % se alcance.

Aplicaciones típicas:

- **Aceites y grasas lubricantes** (como los usados en cables de acero en minería) para verificar que se degradan rápidamente en el ambiente sin causar daño ecológico.

- **Productos industriales, detergentes, cosméticos**, etc.

Aspecto	Detalle
Duración	28 días
Condiciones	Aeróbico, 22 ± 2 °C, agitación constante
Medio	Agua mineral con inóculo microbiano
Criterio de paso	≥ 60 % de CO_2 teórico total
No apto para	Sustancias volátiles o que se adsorban fuertemente

¿Por qué importa en minería?

Al seleccionar un lubricante biodegradable para cables de acero, **un resultado "OECD 301B ≥ 60 %"** garantiza que el producto **no persistirá en el ambiente** y cumplirá con regulaciones como **EPA VGP** o **ISO 14021**

¿Quién los hace en Chile?:

Laboratorio DICTUC (Chile) – realiza OECD 301B para detergentes y aceites industriales

Universidades con laboratorios de toxicología y biodegradabilidad – suelen ofrecer el servicio bajo contrato.

Ejemplo de productos usados en la minería

Producto / Marca	Clase	Tipo de cable	Notas
Wirelife Almasol Coating Grease	Grasa semifluida	Exteriores, alto polvo	Película densa, 12 meses de protección
LE Monolec Penetrant L	Penetrante	> 40 mm, largas longitudes	Penetra 100 % del núcleo
RS Clare ClareGuard Build	Grasa + recubrimiento	Shovels 400 t	Resiste sal, arena y rayos UV
Interflon Grease OG	Grasa complejo Ca/Li	Cables bajo el agua	Excelente adhesión y resistencia al lavado
Shell Gadus S2 V220	Grasa EP2	Grúas puente y malacates	Compatible con sistemas WRL

Proceso rápido de selección paso a paso:

- **Definir ambiente**: ¿salina, polvo fino, temperaturas extremas?

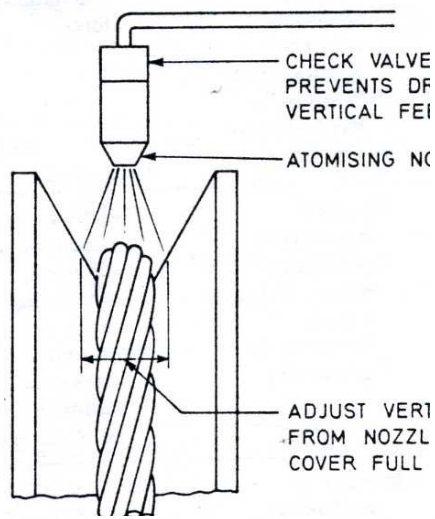
- **Definir cable**: diámetro, construcción (6×36, 8×36, etc.), velocidad de operación.

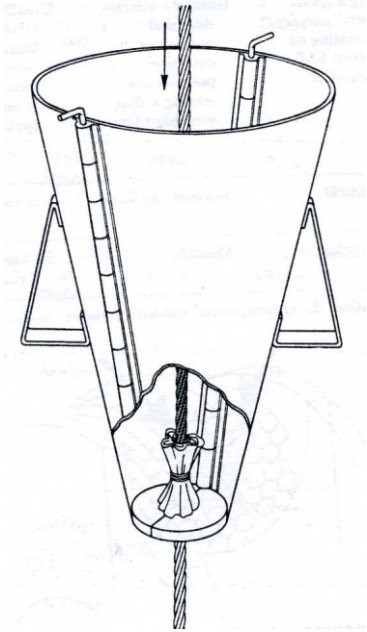
- **Elegir Tipo**:
  - Ambiente extremo + cargas de choque → penetrante + recubrimiento.
  - Interior de planta + polvo → solo recubrimiento.

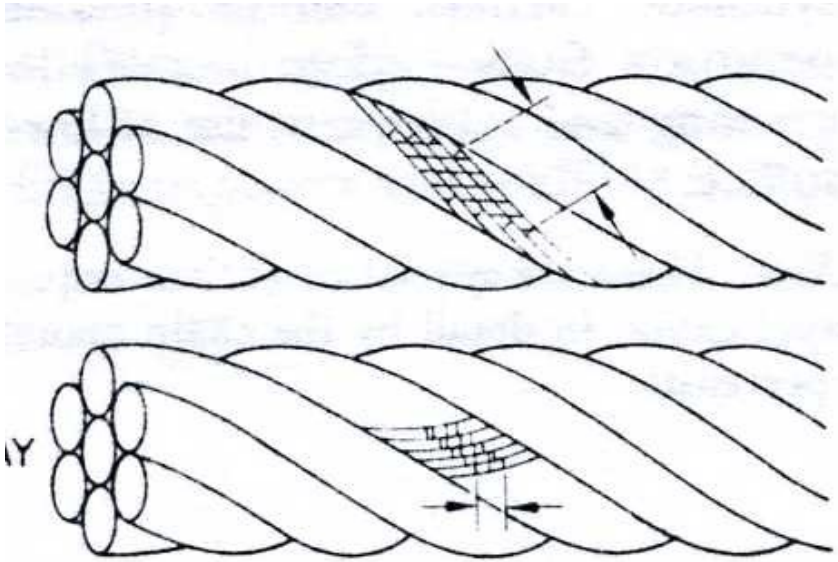
- **Validar especificaciones**: comparar valores de la tablas

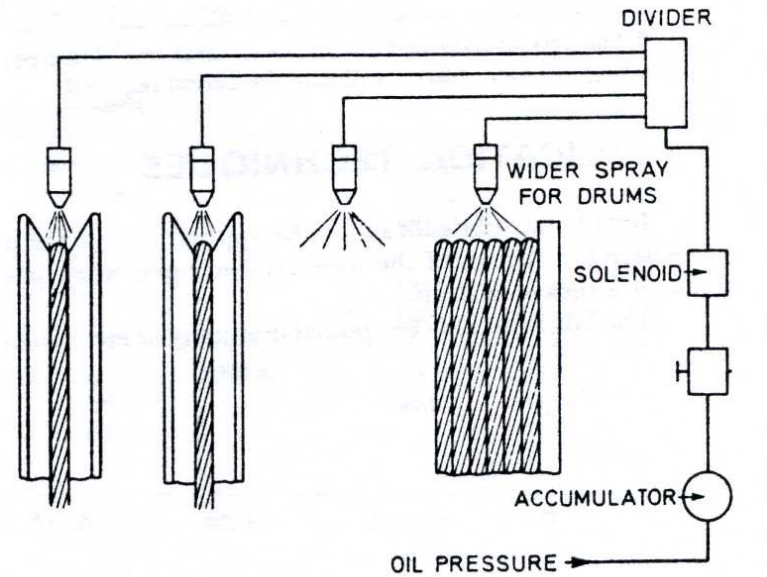
- **Confirmar aplicación**: sistema automático WRL, spray, brocha o inmersión.

Con estos pasos y la tabla de referencia anterior, se puede seleccionar un lubricante que prolongue la vida del cable 2 a 4 veces y reduzca paradas no planificadas en la minería pesada.


CHECK VALVE
PREVENTS DF
VERTICAL FEI
ATOMISING NC
ADJUST VERT
FROM NOZZL
COVER FULL

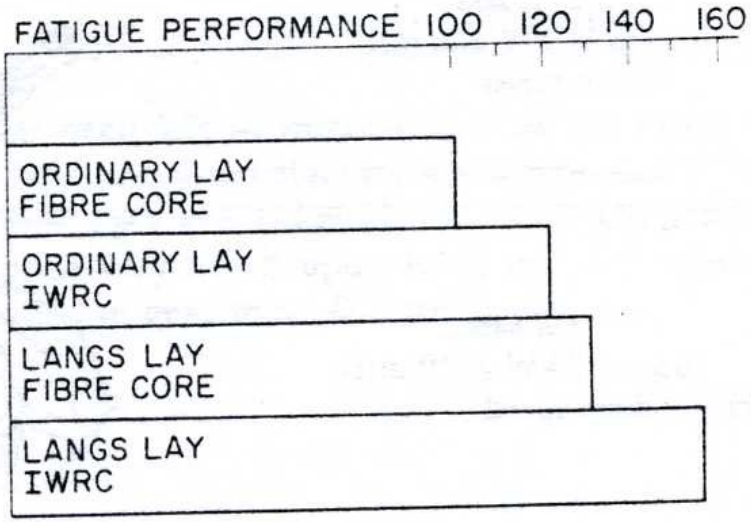


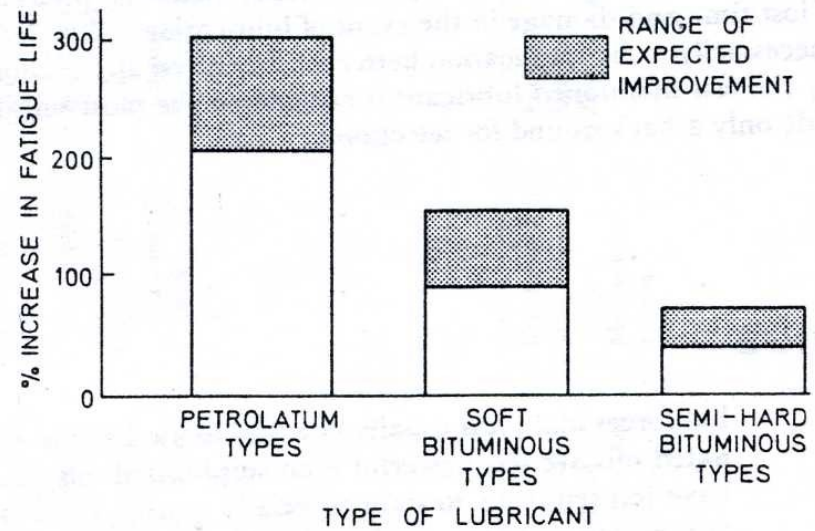


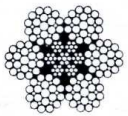

DIVIDER
WIDER SPRAY
FOR DRUMS
SOLENOID
ACCUMULATOR
OIL PRESSURE

Mecanismo	Tipo de Servicio	Viscosidad del aceite en cSt, a 40°C
Grúas, dragas y palas mecánicas. Plataformas para transportar productos terminados en hornos.	Trabajo pesado y de baja velocidad.	80.000 - 270.000 (asfálticos)
Ascensores, malacates, polipastos, etc.	Para subir y bajar cargas a velocidades moderadas.	100 -220 (grado ISO) Con aditivos EP *
Vagonetas para transportar minerales en minas horizontales o inclinadas.	Trabajo pesado a velocidades moderadas y bajas.	5.000 - 26.000 (asfálticos)
Tranvías aéreos, funiculares y cables para exploraciones forestales.	Cables estacionarios sometidos a la acción del agua, polvo, humo o sustancias químicas.	26.000 - 80.000 (asfálticos)
	Trabajo pesado y ambiente poco contaminado.	Lubricantes de película sólida (grafito y bisulfuro de molibdeno) pulverizados con una corriente de aire a presión.
Líneas de transporte de materiales por el suelo	Trabajo pesado y ambiente altamente contaminado.	No se lubrican.

• O emplear lubricantes de película sólida. En caso de que el cable esté a la interperie, es mejor utilizar un lubricante asfáltico de una viscosidad comprendida entre 5000 - 26000 cSt a 40°C

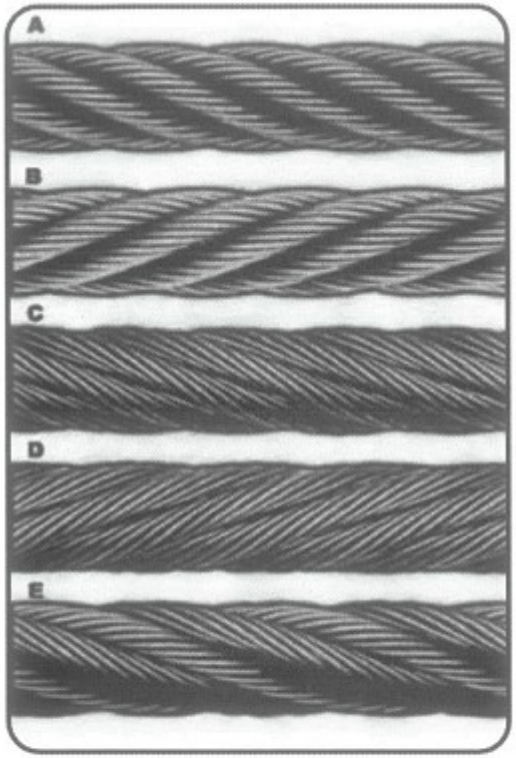




Application		Conveyors, small hoists, small stays, trawl warps*	Excavators (drag), lifts,* sidelines (dredging), mast stays, pendants, crane ropes (small)	Lifts,* drilling lines, scrapers, trip ropes, skip hoists, pile driving	Crane hoists (multi-fall), grabs, slings	Tower cranes (hoist), mobile cranes (small), drop ball cranes, boatfalls	Deck cranes (single fall), mobile cranes (large)
Construction		6 × 7(6/1) *IWRC*	6 × 19(9/9/1) *IWRC*	6 × 19 (12/6+6F/1) *IWRC*	6 × 36 (14/7 and 7/7/1) *IWRC*	17 × 7(6/1) *FC*	12 × 6 over 3 × 24
							
MBL	kgf	$d^2 \times 64.6$	$d^2 \times 64.4$	$d^2 \times 65.6$	$d^2 \times 64.2$	$d^2 \times 57.3$	$d^2 \times 54.0$
	kn	$d^2 \times 0.633$	$d^2 \times 0.632$	$d^2 \times 0.643$	$d^2 \times 0.630$	$d^2 \times 0.562$	$d^2 \times 0.530$
Wt	kgf/100 m	$d^2 \times 0.382$	$d^2 \times 0.398$	$d^2 \times 0.408$	$d^2 \times 0.406$	$d^2 \times 0.372$	$d^2 \times 0.362$
E	kfg/mm²	7000	6600	6600	6600	5500	5500
	N/mm²	68 600	64 700	64 700	64 700	53 900	53 900

Breaking Loads based on 180 Grade tensile (180 kgf/mm²).

CABLES

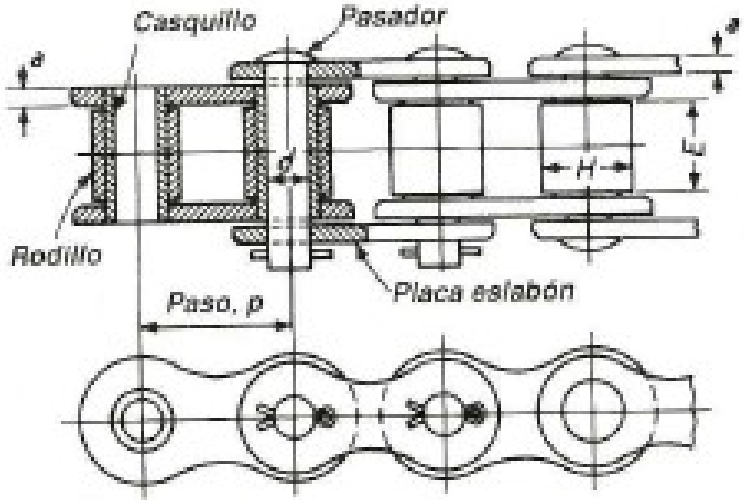


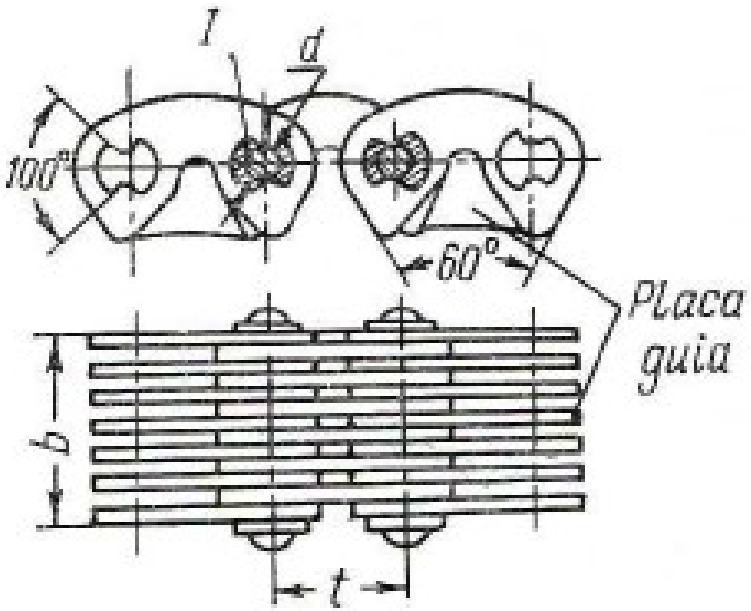
Comparación de entorchado de cables de acero:
A. Derecho angular
B. Izquierdo angular
C. Derecho alargado
D. Izquierdo alargado
E. Derecho alternado

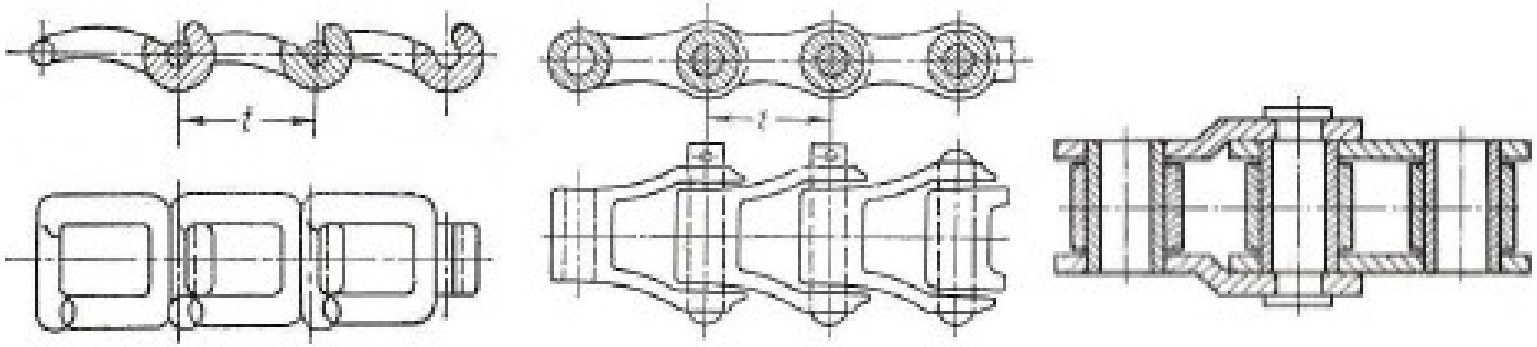
Para más información sobre lubricantes para cables refiérase a la norma ISO 4346

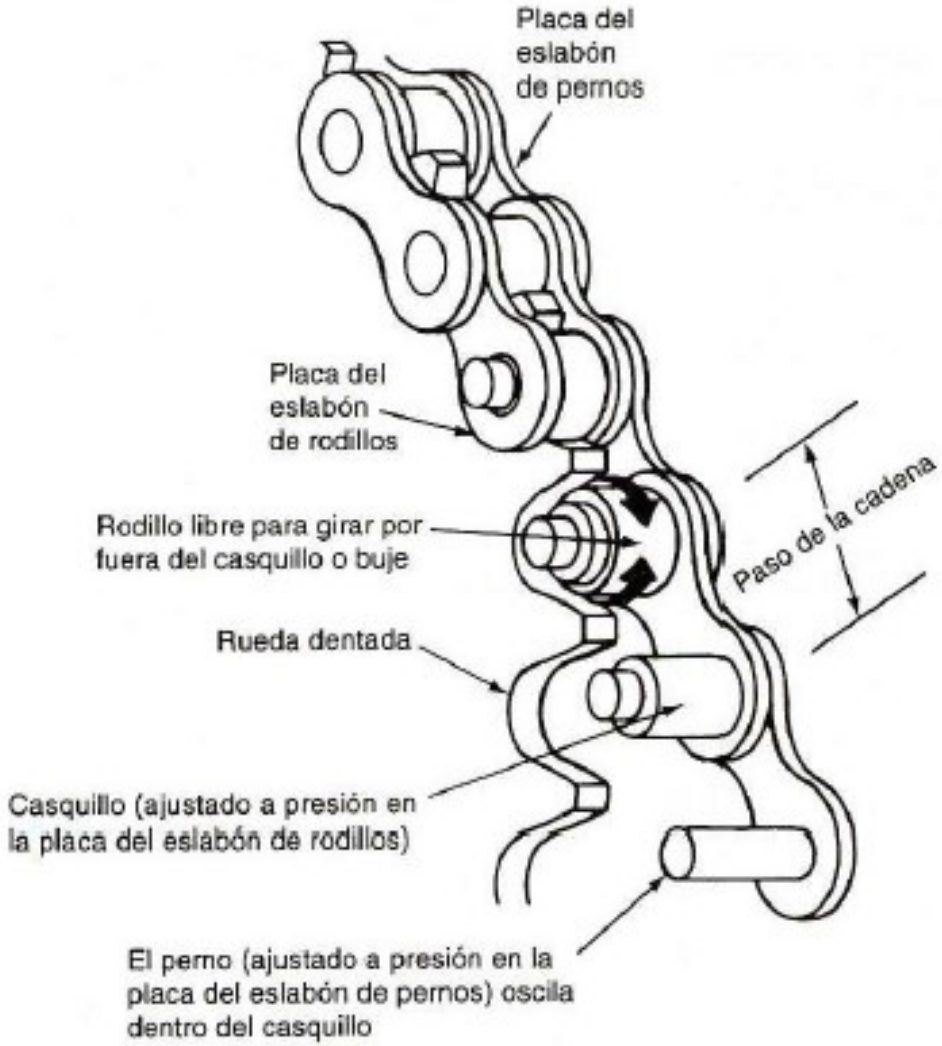
	Asfalto	Petrolato	Grasa	Aceite penetrante
Viscosidad				
100 °C (cSt)	84.53	23.96	–	
40 °C (cSt)	Semisólido	Semisólido	2 (2707)	22-32
Punto de goteo				
°F	166	162	185	
°C	74.4	72.2	85.0	
Penetración (trabajada a 60 golpes) dmm	72	86	209	
Adhesión				
psi	11.3	9.7	–	
kPa	77.9	66.8	–	
Lavado por agua (%)	0.03	1-5	–	
Herrumbre, calificación	1	1	1	
4 bolas EP				
Carga soldadura (kg)	315	–	160	250
Índice carga desgaste	46.7	–	31.1	50
4 bolas desgaste				
Cicatriz a 20 kg (mm)	0.54	0.69	0.30	
Cicatriz a 40 kg (mm)	0.94	0.72	0.61	
Temperatura de salpique				
°F	–	160	–	
°C	–	71.1	–	
Herrumbre ASTM D665	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa

CADENAS


Casquillo
Pasador
Rodillo
Placa eslabón
Paso, p
H
E
d


I
d
100°
60°
Placa guia
b
t


t
t


Placa del eslabón de pernos
Placa del eslabón de rodillos
Rodillo libre para girar por fuera del casquillo o buje
Paso de la cadena
Rueda dentada
Casquillo (ajustado a presión en la placa del eslabón de rodillos)
El perno (ajustado a presión en la placa del eslabón de pernos) oscila dentro del casquillo

Selección de lubricantes para cadenas metálicas (industria y minería)

1. ¿qué hay que analizar antes de elegir?

- **Carga sobre la cadena** (tensión, impactos).
- **Velocidad lineal** (v ≤ 1 m/s → manual; 1–8 m/s → goteo; > 8 m/s → aspersión).
- **Temperatura** (–30 °C … +120 °C normal, +120 … +250 °C horno, > 250 °C forja).
- **Contaminación** (agua, polvo fino, ácidos, sal).
- **Normativa / grado alimenticio** (NSF H1 si hay contacto accidental con alimentos).

¿ NSF H1 ?

NSF H1 es un registro que otorga la organización NSF International.

Cuando un **aceite para cadenas** lleva la marca **NSF H1**, significa que:

•Está **aprobado para usarse en la industria alimentaria** y su **contacto accidental con los alimentos está permitido**.

•Su formulación cumple la normativa de la FDA (Food and Drug Administration de EE. UU.); no contiene sustancias tóxicas ni dañinas.

•Solo se emplea en situaciones donde el contacto con el alimento puede ser **ocasional o incidental**, nunca permanente.

•El envase o etiqueta mostrará el logotipo de NSF, la categoría H1 y un número de registro específico.

En resumen: **un aceite para cadenas NSF H1 es un lubricante apto para la industria alimentaria, seguro en caso de contacto accidental con alimentos.**

2. Tipos de lubricantes y usos mas comunes

Tipo	Base	Viscosidad 40 °C	Aditivos clave	Cuándo usarlo	Ejemplo
Aceite penetrante sintético	PAO/Ester	68–220 cSt	EP, MoS_2, anticorrosivo	Interior de eslabones, alta velocidad, polvo fino	Intercad AV G
Aceite de cadena "secador"	Ester + solvente	30–100 cSt	Polimeros PTFE	Aplicación por aspersión, secado rápido, no gotea	Interlub Cad Tex HT
Grasa semifluida especial cadena	Aluminio-complejo	NLGI 0–1	5 % grafito/MoS_2	Alta carga, temperatura 0–180 °C, lavado por agua	RS Clare Chain Guard
Película seca (dry-film)	Ester + ceras + PTFE	—	Sólidos < 5 µm	Hornos > 250 °C, grado alimenticio	JAX TAM 350
Aceite biodegradable	Éster vegetal	100–320 cSt	EP, anticorrosivo	Líneas costeras o minas con restricción ambiental	Earthwise EAL 3353

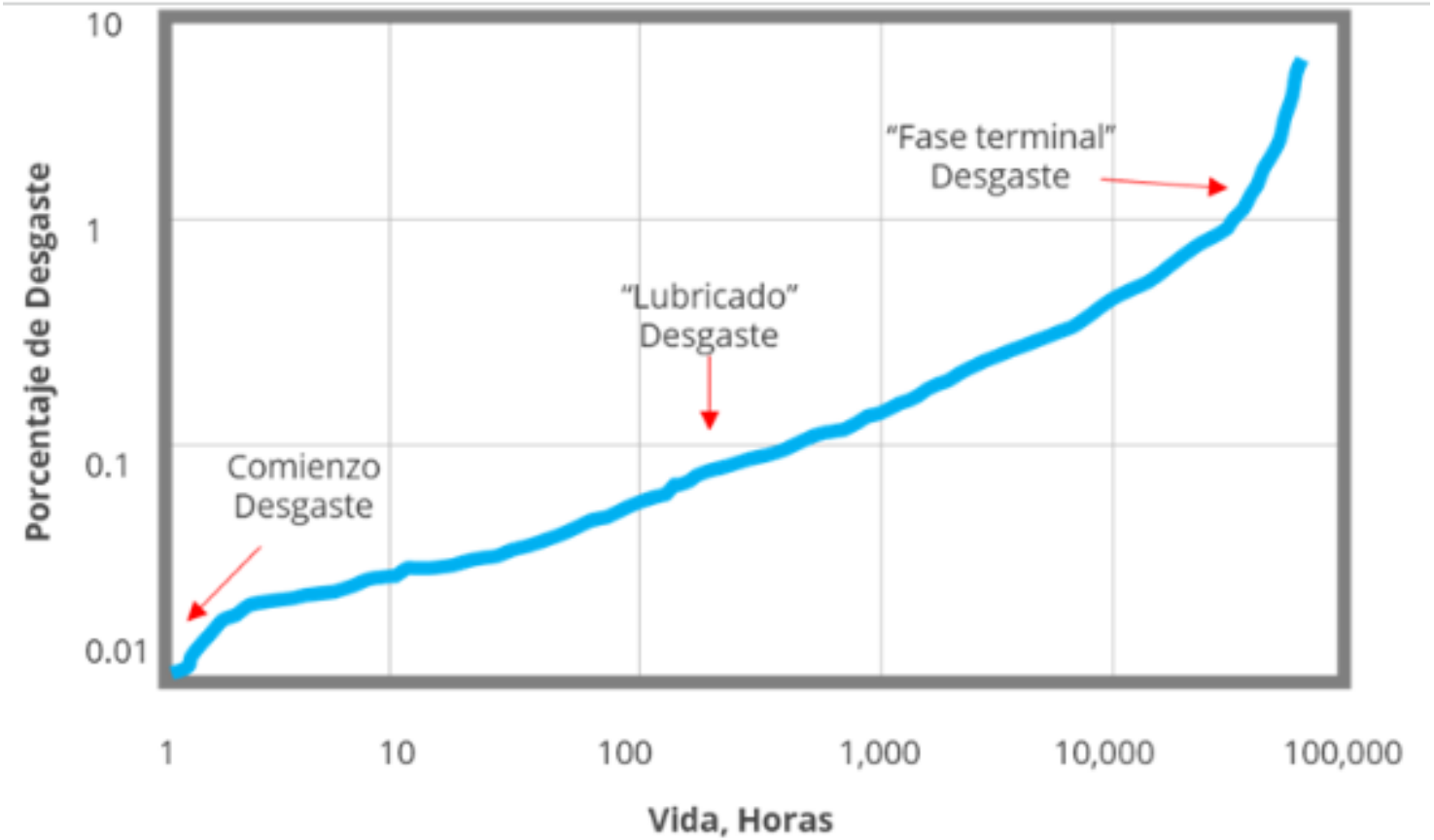
3. Cómo decidir en forma rápida uso de lubricantes en las cadenas

Condición operativa	Velocidad	Temperatura	Contaminación	Lubricante ideal
Transportadora de mineral (minera)	0,5–3 m/s	10–60 °C	Polvo + agua	Aceite 220 cSt PAO + EP + anticorrosivo
Cadena de horno sinterizado	0,2–1 m/s	250 °C	Polvo abrasivo	Grasa sintética Cad Tex HT
Cadena de embutición profunda (automoción)	5–10 m/s	40–80 °C	Aceite de corte residual	Aceite penetrante 68 cSt + solvente
Cadena en planta de alimentos	0,5–4 m/s	0–100 °C	Lavado frecuente	Aceite NSF H1 100 cSt + PTFE
Cadena de draga marina	0,1–1 m/s	–10–40 °C	Sal, arena, agua salada	Biodegradable éster 220 cSt + EP, lavable

4. Proceso de selección paso a paso

- **Definir condiciones**: anotar carga, velocidad, T, agua, polvo.
- **Descartar lo que NO se debe usar**: aceite hidráulico usado, grasas corrientes, aceite de motor.
- **Elegir viscosidad según T** (regla práctica):
  – T < 0 °C → ISO VG 68.
  – 0–60 °C → ISO VG 100–150.
  – 60–120 °C → ISO VG 220.
  – > 120 °C → sintético 320 o grasa especial.
- **Validar aditivos**: EP si carga > 1000 N, anticorrosivo si hay agua, sólidos si T > 200 °C.
- **Confirmar aplicación**: manual, goteo, aspersión, o sistema automático (WRL).
- **Ensayo piloto**: 1–2 semanas midiendo consumo, ruido y temperatura del eslabón.

Con esta matriz se puede pasar de: “tenemos una cadena de 40 mm en un horno a 220 °C” a “necesitamos un aceite sintético ISO VG 220 con aditivos EP y PTFE, aplicado por goteo a 4 gotas/min” en menos de 5 minutos.



Vida de una cadena con lubricación continua.

Comparación de la vida de una cadena con lubricación continua contra una cadena solamente con lubricación inicial.

El aceite para cadenas debe tener las siguientes características:

- Baja viscosidad para penetrar en las superficies internas – el uso de solventes o un agente penetrante ayuda a lograr este objetivo sin comprometer la viscosidad operativa
- Suficiente resistencia para mantener la película lubricante en condiciones de extrema presión – se pueden usar lubricantes sólidos
- Libre de componentes corrosivos
- Habilidad para mantener su desempeño bajo diferentes condiciones de temperatura, humedad, etc.

Factores de servicio para transmisiones por cadena de rodillos

Tipo de carga conducida	Tipo de potencia de entrada: Máquina de combustión interna con transmisión hidráulica	Motor eléctrico o turbina	Máquina de combustión interna con transmisión mecánica
Suave	1.0	1.0	1.2
Choque moderado	1.2	1.3	1.4
Choque pesado	1.4	1.5	1.7

Clasificaciones de carga

Carga suave	Carga de choque moderado	Carga de choque pesado
Agitadores—Líquido puro	Maquinaria para el trabajo de la arcilla—Molinos de barro amasado	Maquinaria para el trabajo de la arcilla—Prensadora de ladrillos, maquinaria briqueteadora
Transportadores—Cargados o alimentados uniformemente (banda articulada, ensamblado, banda, paletas, horno, tornillo sin fin)	Transportadores—Trabajo pesado y cargados NO uniformemente (banda articulada, ensamblado, banda, cangilón, paletas, horno, tornillo sin fin)	Transportadores—Reciprocantes y agitadores
Ventiladores—Centrífugos y ligeros, diámetro pequeño	Grúas y malacates—Trabajo mediano, montacargas de cajón (movimiento de viaje y movimiento de carretilla)	Grúas y malacates—Trabajo pesado, incluyendo explotación forestal, beneficio de madera y equipo rotatorio para taladrar
Árboles de transmisión—Ligero	Dragas—Cable, carrete y transportador	Dragas—Transmisiones de cabezas cortadoras, transmisiones de guías, transmisiones de pantallas
Máquinas—Todos los tipos con cargas no reversibles uniformes.	Industria de alimentos—Rebanadoras de remolacha, mezcladoras de pasta, molinos de carne	Molinos de martillos
Pantallas—Ingestión de agua con rotación progresiva en el viaje (alimentada uniformemente)	Esmeriladoras	Máquinas—Prensa punzonadora, cizalla, cepilladoras
Equipo para la disposición de aguas de albañal—Servicio interno (alimentado uniformemente)	Industria de lavandería—Lavadoras, tambores giratorios	Máquinas—Todos los tipos con cargas de choque de impacto severo, o variaciones de velocidad y servicio en reversa
	Árboles de transmisión—Servicio pesado	Molinos de metal—Banco de estirar, máquinas conformadoras, tajaderas-transmisiones de pequeños trenes de laminación, estiradoras o aplanadoras de alambre
	Máquinas—Transmisiones principales y auxiliares	Molinos—(del tipo rotatorio) de bolas, hornos de cemento, laminadores de barras, molinos de tambor de frotación
	Máquinas—Todos los tipos con choque moderado y cargas no reversibles	Industria del papel—Mezcladoras, calandrias, laminadoras de caucho
	Pantallas—Rotatorias (piedra o grava)	Industria textil—Maquinaria cardadora
	Industria textil—Calandrias, maquinaria para teñir, planchadoras, perchadores, enjabonadoras, hiladoras, estructuras de tiendas	

Figura 9.3: Tabla que define factores de servicio

Los pasos a seguir en la selección de la cadena cualquiera sea el fabricante deberán considerar los siguientes items:

1. Clasificación de la carga. Implica obtener el factor de servicio F_s del catálogo considerando el tipo de carga de la máquina. La figura 9.3 muestra una tabla dada por algún fabricante donde se puede obtener F_s en función de las características de las máquinas impulsoras e impulsivas.

2. Determinar la potencia de diseño P_d según: $P_d = P_n F_s$, donde P_n es la potencia nominal.

3. Con la potencia de diseño P_d y las rpm del piñón se entra en una gráfica que según la zona en que se encuentra especifica la cadena necesaria para esos requerimientos. Ver figura 9.4

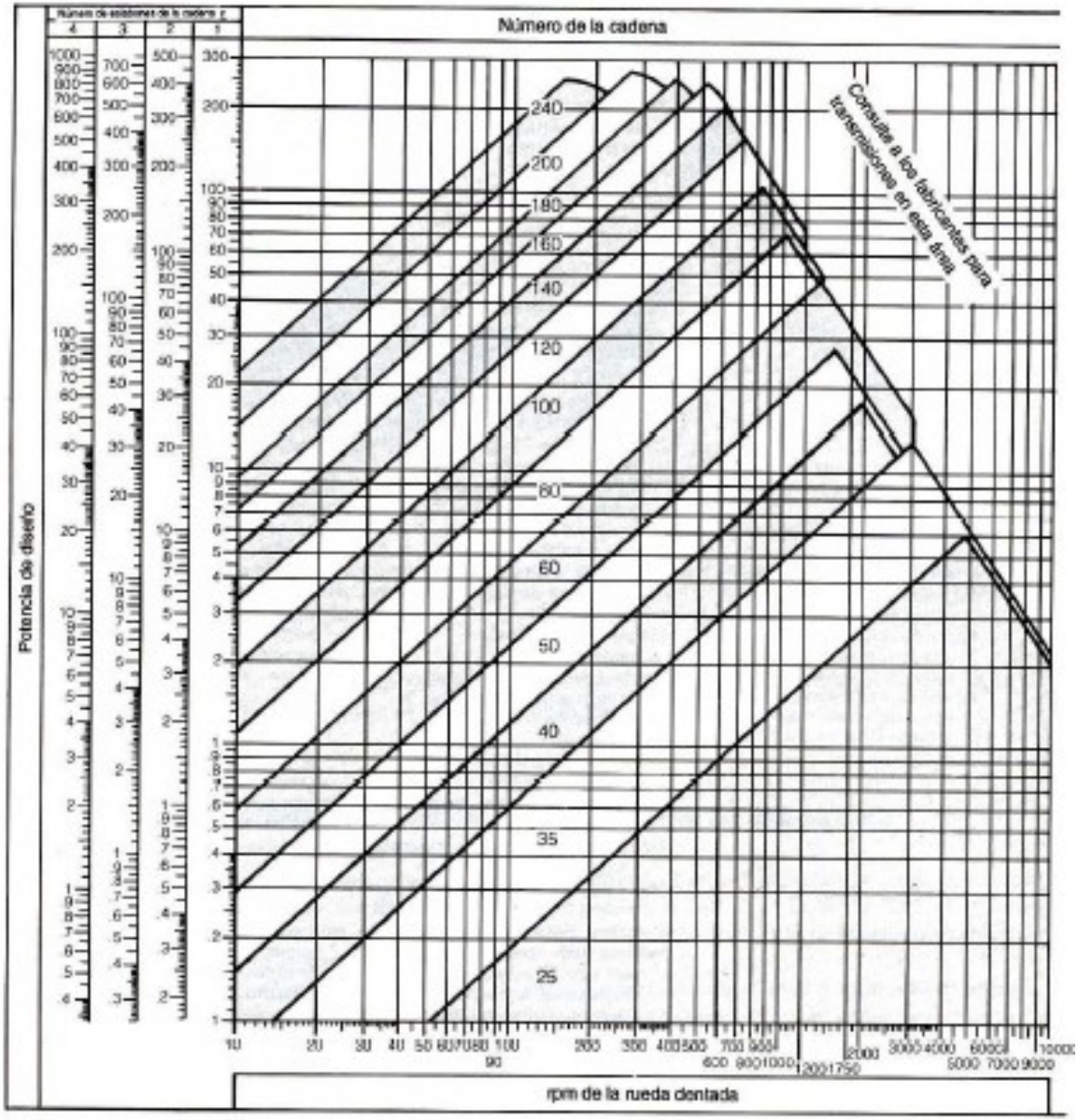
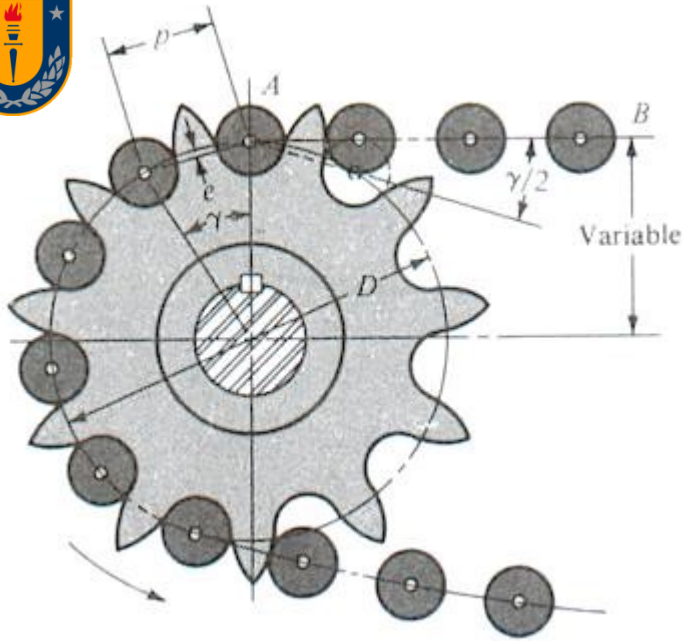
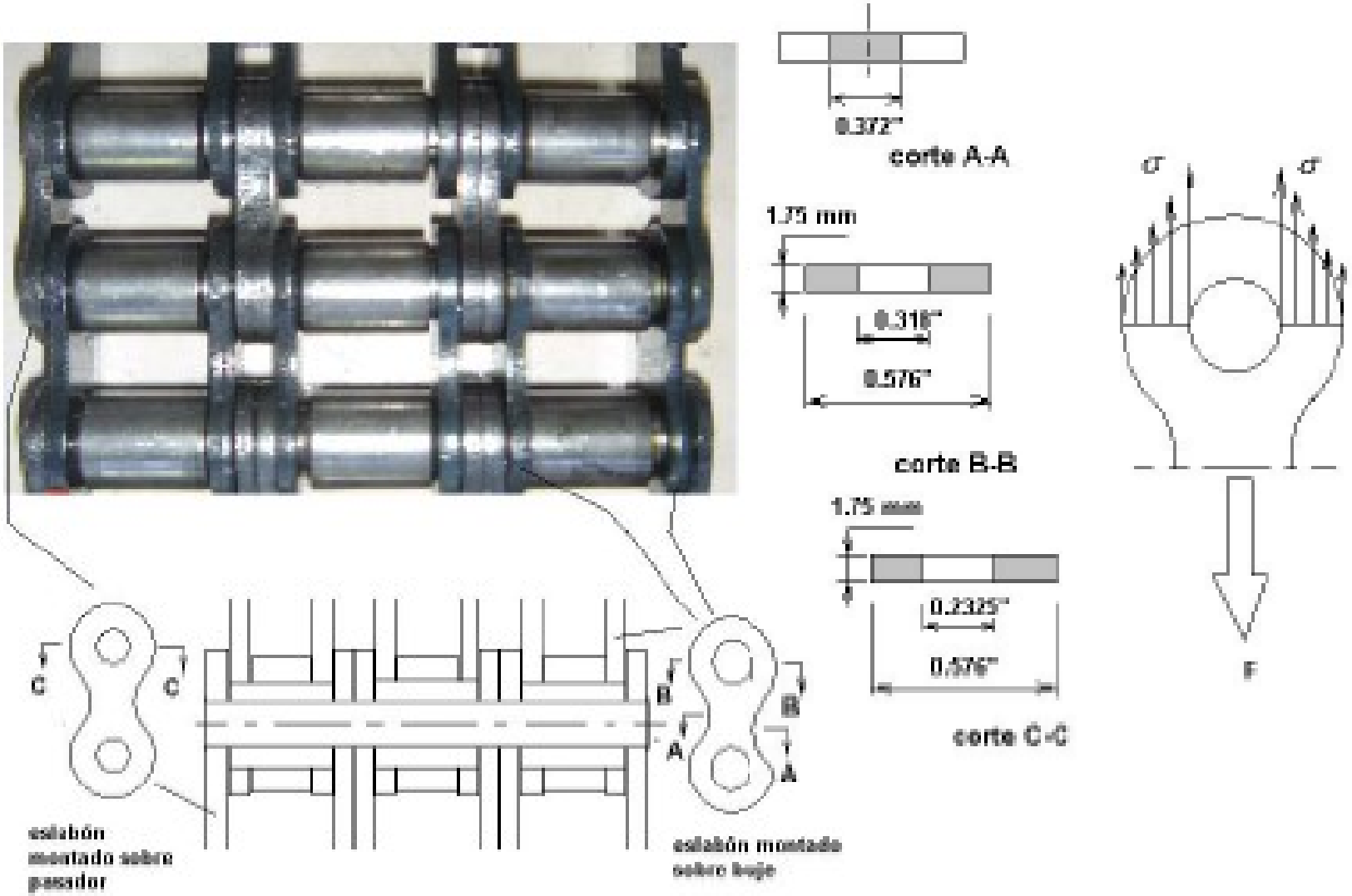


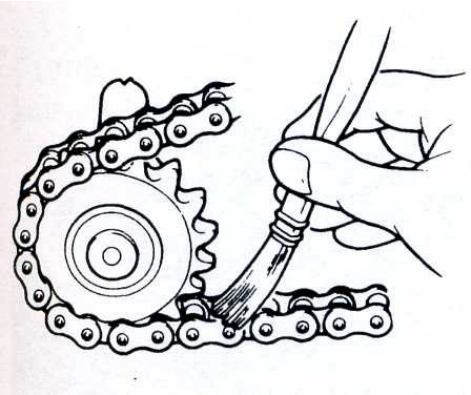
Figura 9.4: Potencia vs rpm

Las cadenas pueden fallar de varias formas:

1. Tracción en las zonas resistentes del eslabón
2. Corte en la zona en la perforación del eslabon
3. Flexión en los pasadores
4. deformación en la zona de unión eslabón-pasador
5. Corte en el pasador

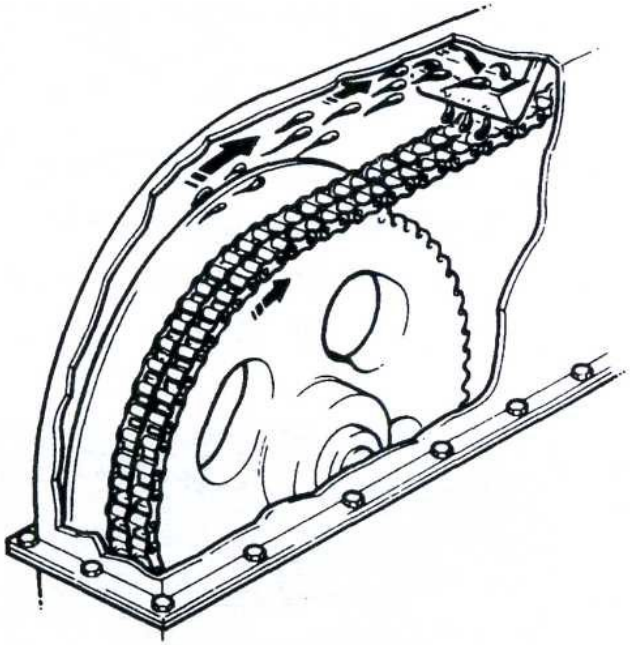

p
A
B
γ/2
e
γ
Variable
D

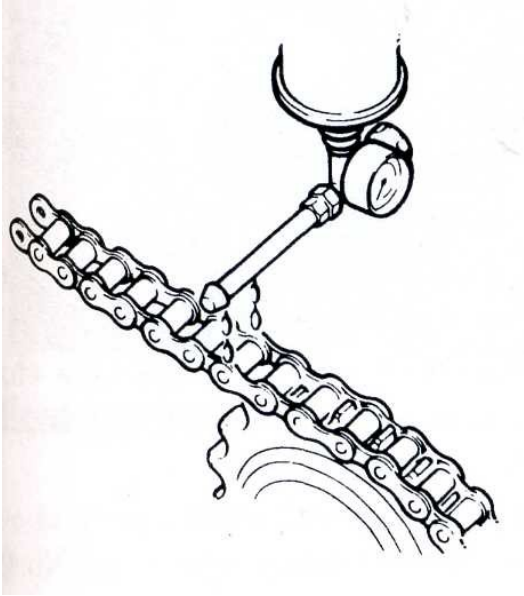

0.372"
corte A-A
1.75 mm
0.316"
0.576"
corte B-B
1.75 mm
0.2325"
0.576"
corte C-C
σ
σ
F
C
C
B
B
A
A
eslabón montado sobre pasador
eslabón montado sobre buje

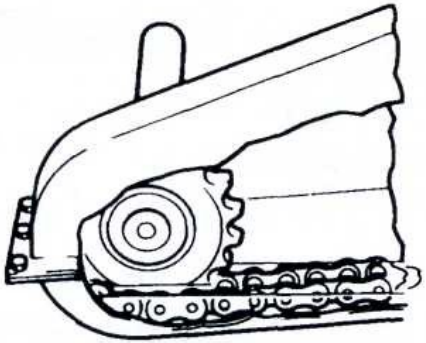


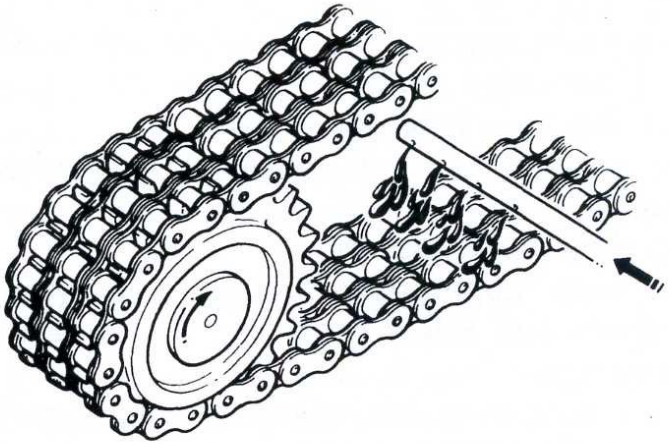
LOW POWER

LOW SPEED









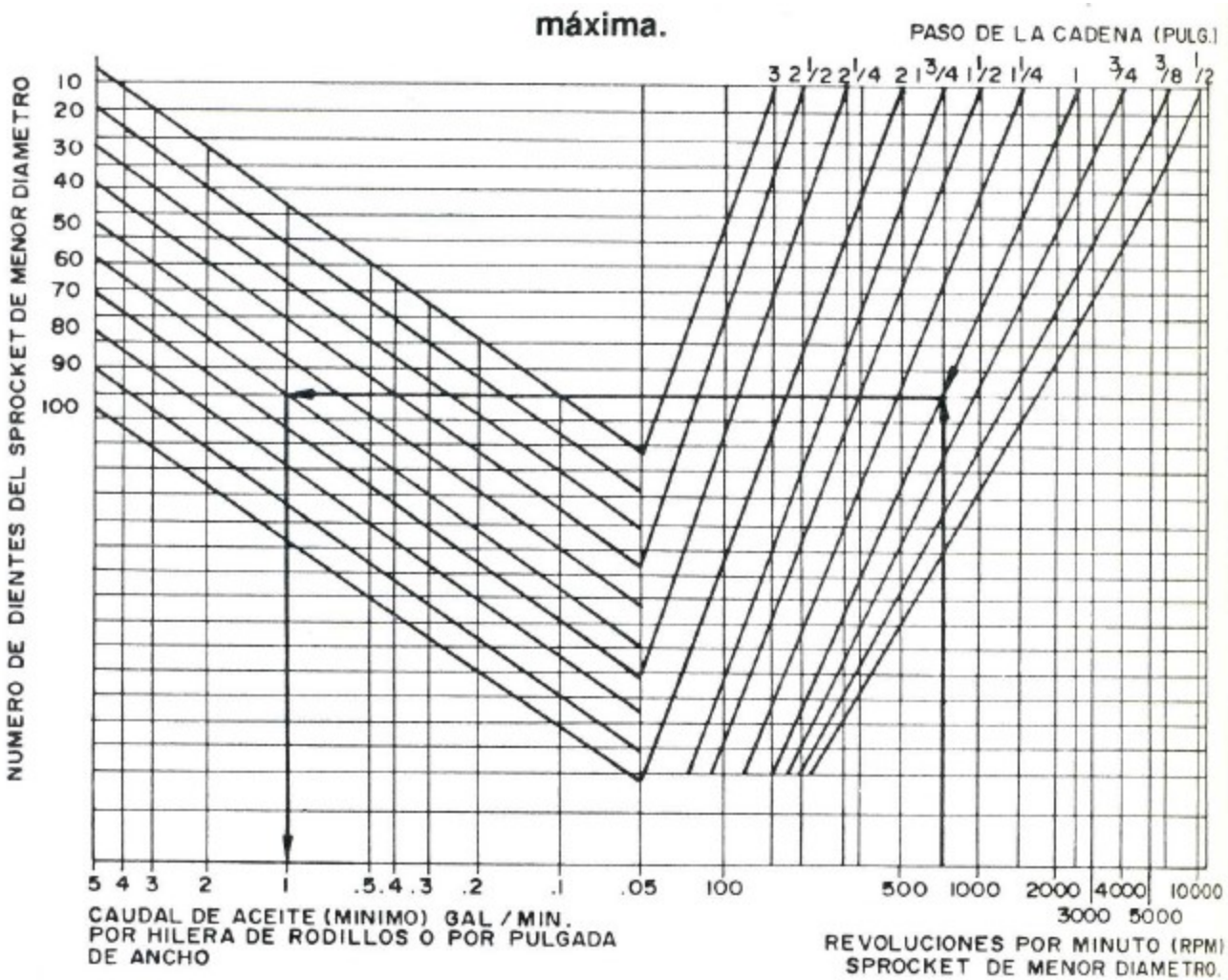


Figura 4.15: Cantidad mínima de aceite necesario para lubricar cadenas de rodillos y silenciosas de acero

Tipo de cadena	Tipo de servicio	Condiciones de operación	Método de lubricación	Temperatura media de funcionamiento °C	Grado ISO
Rodillos Silenciosa Rodillos Silenciosa Rodillos Silenciosa	Cadenas a la intemperie funcionando a bajas velocidades	Cadenas nuevas o usadas, en buenas condiciones, medio ambiente relativamente limpio	Manual con aceitera o por goteo	Por debajo de 4,50 4,50 – 38 Por encima de 38	46 100 68 – 100 100 – 150 150 – 220 220 – 320
Rodillos Silenciosa Rodillos Silenciosa Rodillos Silenciosa		Cadenas viejas o gastadas, expuestas a la acción del polvo, la humedad, el agua o sustancias químicas		Por debajo de 4,50 4,50 – 38 Por encima de 38	68 100 100 – 150 150 – 220 220 320
Rodillos Silenciosa Rodillos Silenciosa Rodillos Silenciosa	Cadenas recubiertas dentro de una guarda metálica, funcionando a bajas velocidades	Cadenas nuevas o usadas en buenas condiciones, medio circundante limpio	Por inmersión o por disco	Por debajo de 4,50 4,50 – 38 Por encima de 38	46 100 100 100 – 150 100 – 150 150 – 220
Rodillos Silenciosa Rodillos Silenciosa Rodillos Silenciosa		Cadenas viejas o gastadas, expuestas a la acción del polvo, la humedad, el agua o sustancias químicas		Por debajo de 4,50 4,50 – 38 Por encima de 38	100 100 – 150 100 – 150 150 – 220 150 – 220 320
Rodillos Silenciosa Rodillos Silenciosa Rodillos Silenciosa	Cadenas a la intemperie o protegidas por una guarda metálica bien hermética	Cadenas en buenas condicones y protegidas del contacto con materiales abrasivos o corrosivos	A presión o por circulación	Por debajo de 4,50 4,50 – 38 Por encima de 38	46 46 68 68 100 150

Figura 4.16: Selección de la viscosidad del aceite requerido para lubricación de cadenas

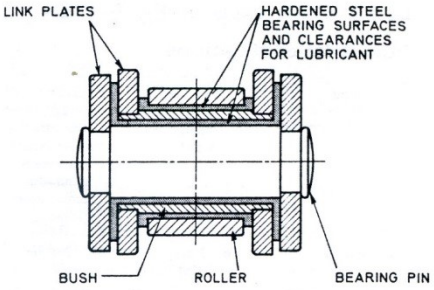
LUBRICATION

Oil

A mineral oil of viscosity rating dependent on the ambient temperature is the most suitable lubricant.

It is essential that a chain is adequately lubricated throughout its life. The type and amount of lubrication depends mainly upon the speed of the drive.

Care must be taken to ensure that the lubricant reaches the bearing area of the chain. This can be done by directing the oil into the clearances between the inner and outer link plates, preferably at the point where the chain enters the wheel on the bottom strand.



Choice of lubricant grade

Ambient temperature		*Lubricant rating*	
°C	°F (approx.)	SAE	BS 4231 grade
−5 to +25	25–75	30	100
25–45	75–110	40	150–220
45–65	110–150	50	320

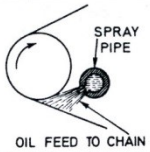
How to apply lubricant

Manual
Low power Low speeds

Drip feed
(up to 37 kW at 6 m/s)
Chain speed

Oil bath
(up to 37 kW at 10 m/s)
Chain speed

Pump and sump
For any speeds and/or power conditions: essential for drives of 37 kW and over; copious supply of oil not only lubricates but also cools



Grease

It is important that the lubricant should reach the working surfaces of the chain. In order to ensure this, the grease should be heated until it becomes fluid and the chains totally submerged and allowed to soak until all air bubbles have ceased. Working the chains back and forth will facilitate effective penetration to the pin/bush working areas.

To smear thick grease onto the chain exterior is to seal in any existing dirt and moisture and does not adequately lubricate.

Regular and frequent replenishment of the grease is important, which necessitates the use of a heated grease bath on each occasion, coupled with the need for equally regular cleaning of the chain.

This system is not always easily achieved by the user and the alternative is to use oil applied normally.

Abnormal ambient temperatures

For elevated temperatures up to 250°C dry lubricants, such as colloidal graphite or MoS_2 in white spirit or synthetic carriers, can be suitable. Similarly, at temperatures from −5° to −40°C low-temperature initial greasing and subsequent use of low-temperature oils may suffice.

Note: These are special conditions requiring consideration of the application in detail by the chain manufacturer and lubrication specialists.

J. C. MOXON

CADENAS

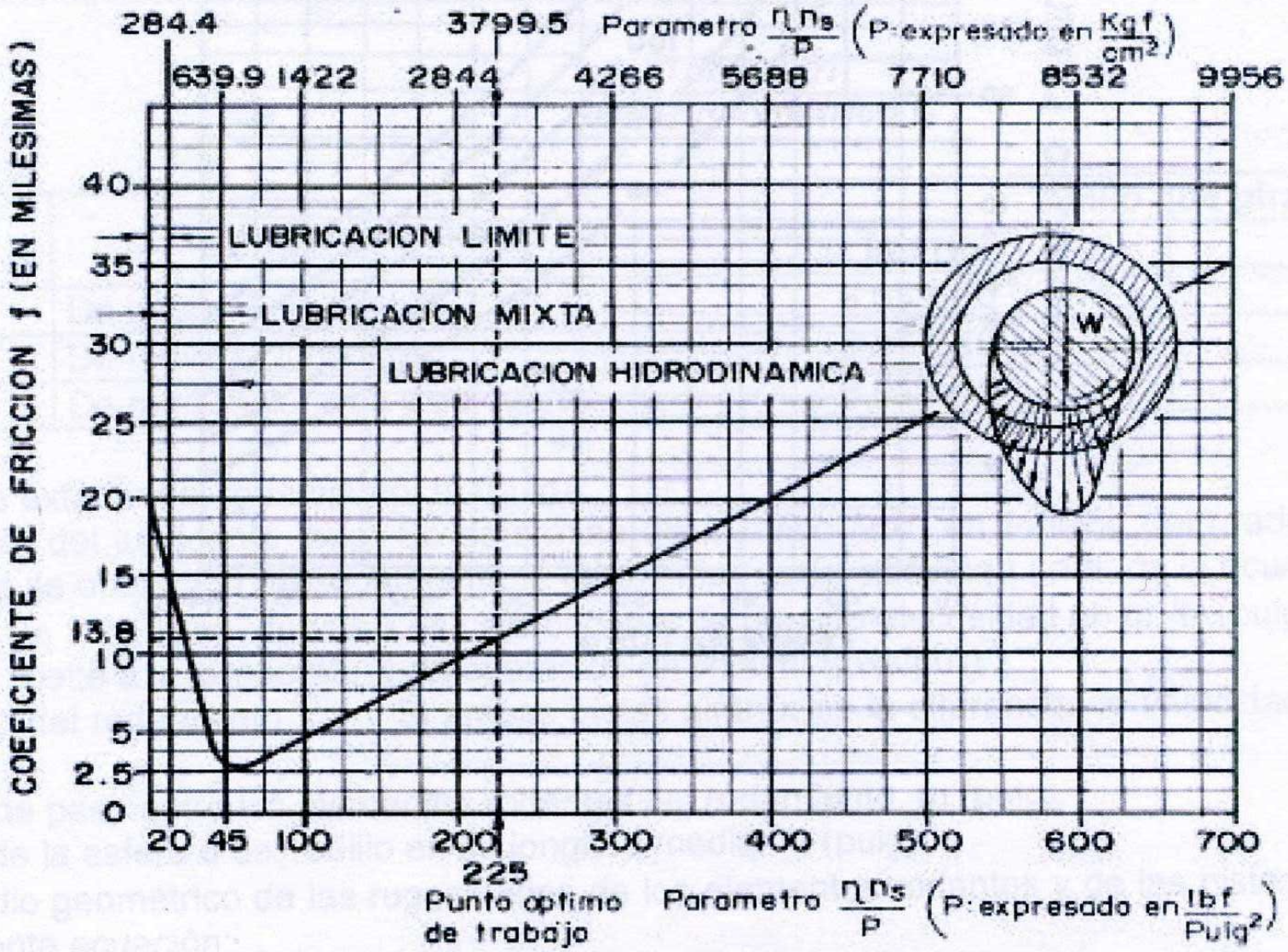
Lubricantes para cadenas recomendados para condiciones normales de operación				
Paso de la cadena, pulg.(2)	Viscosidad, cSt at 40°C(1)	Grado ISO	Lubricante recomendado	
			Cadenas expuestas	Cadenas cerradas
1/4" 5/8"	51.6 a 90.5	68	Aceite mineral ISO 68	Aceite de guías ISO 68 Aceite hidráulico AW ISO 68
3/4" 1-1/4"	90.5 a 133	100	Aceite mineral ISO 100	Aceite perforación ISO 100 Aceite de máquina AW ISO 100
1-1/2" y mayores	133 a 280	220 o 320	Aceite para guías ISO 220, o de perforación ISO 320	Aceite perforación ISO 320 Aceite de máquina AW ISO 320

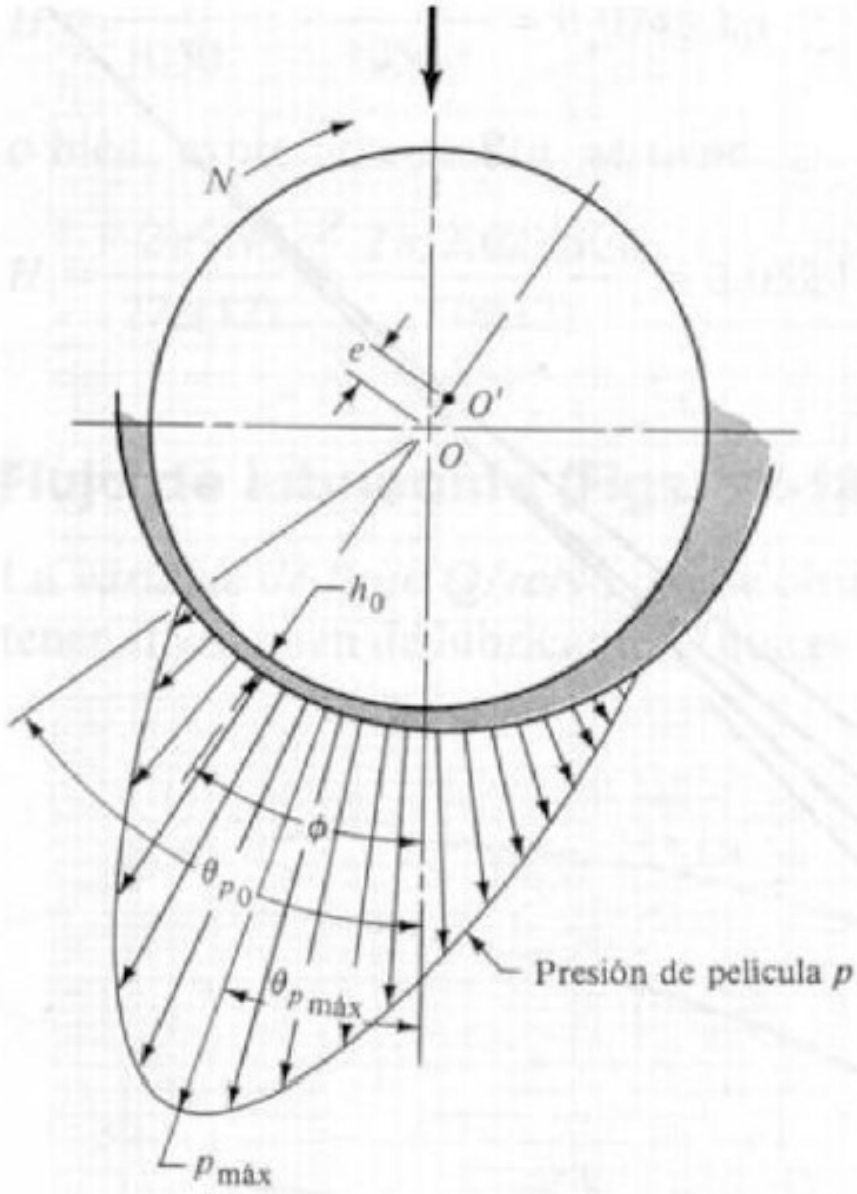
(1) Para temperaturas ambiente por arriba de los 40°C (104°F) use EP ISO 460
(2) El paso es la distancia del centro de un perno al centro del otro en un eslabón

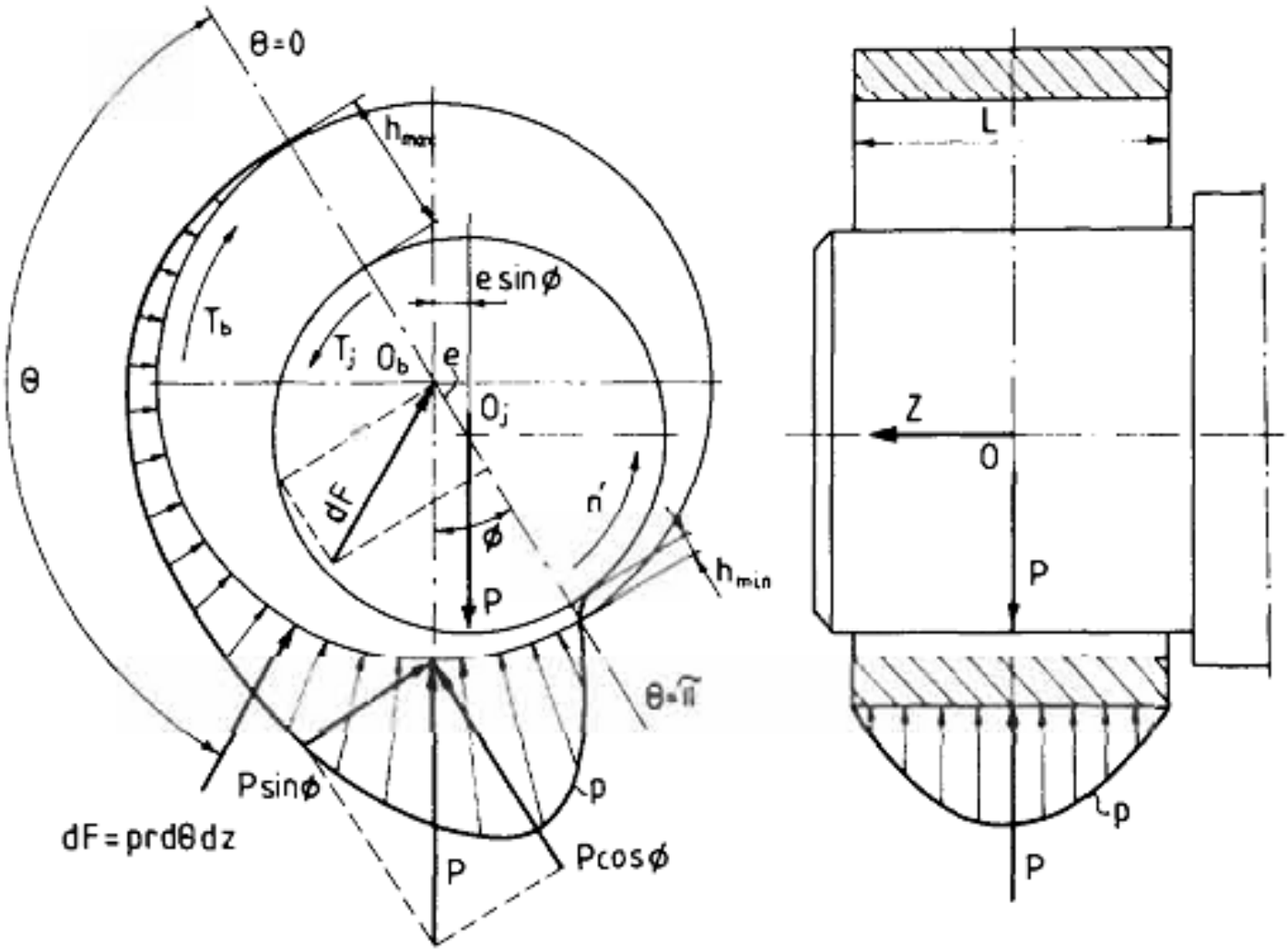
DESCANSOS DESLIZANTES

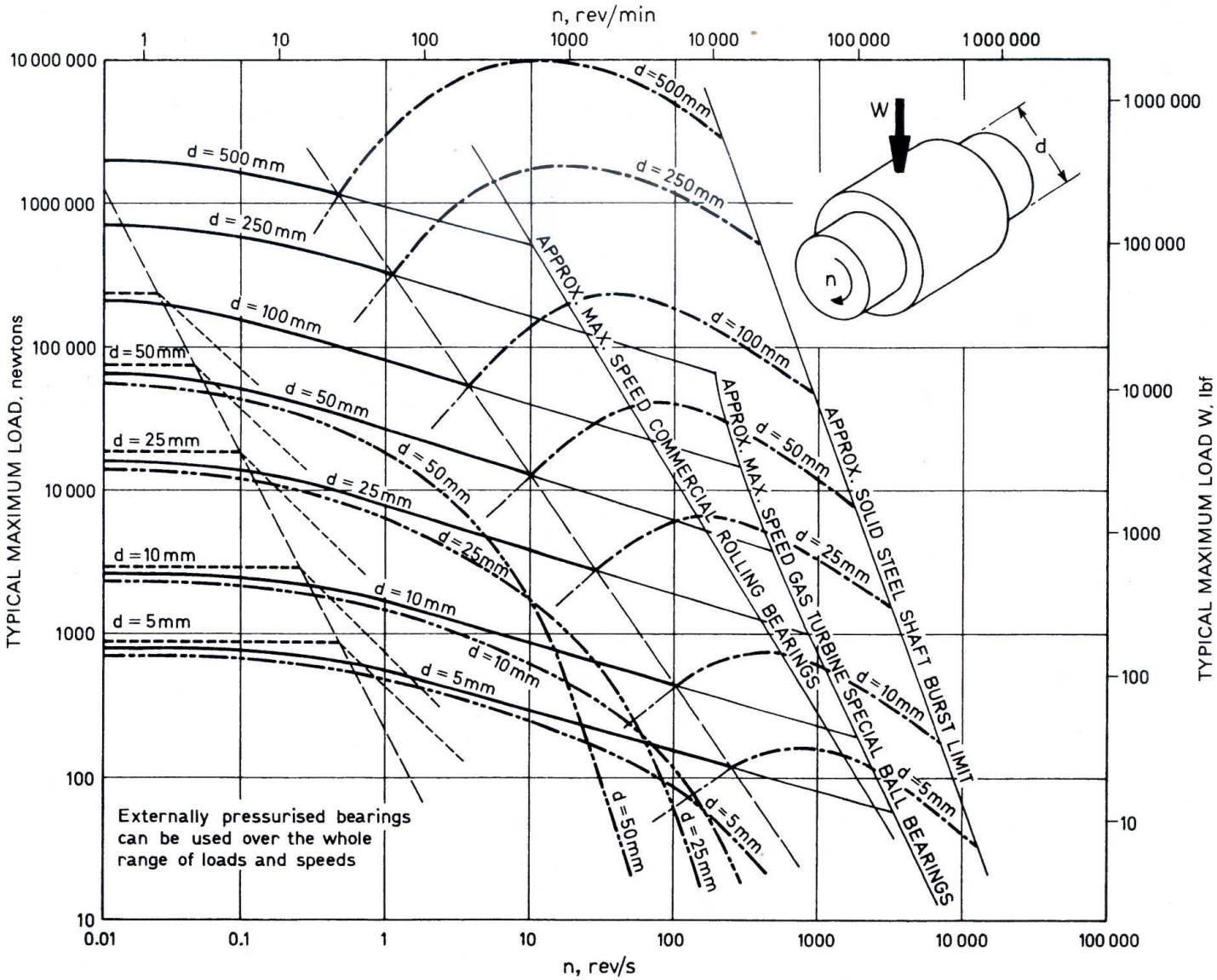
(COJINETES PLANOS)

Diferentes tipos de películas lubricantes




N
e
O'
O
h_0
ϕ
θ_{p0}
$\theta_{p\,máx}$
Presión de película p
$p_{máx}$


θ=0
h_max
e sinφ
T_b
T_j
O_b
e
θ
O_j
dF
n'
φ
P
h_min
θ=π
Psinφ
p
dF=prdθdz
P
Pcosφ
L
Z
O
P
p
P


n, rev/min
1
10
100
1000
10 000
100 000
1 000 000
10 000 000
1000 000
100 000
10 000
1000
100
10
TYPICAL MAXIMUM LOAD, newtons
TYPICAL MAXIMUM LOAD W, lbf
0.01
0.1
1
10
100
1000
10 000
100 000
n, rev/s
d = 500 mm
d = 250 mm
d = 100 mm
d = 50 mm
d = 25 mm
d = 10 mm
d = 5 mm
d = 500mm
d = 250mm
d = 100mm
d = 50mm
d = 25mm
d = 10mm
d = 5mm
APPROX. MAX. SPEED COMMERCIAL ROLLING BEARINGS
APPROX. MAX. SPEED GAS TURBINE SPECIAL BALL BEARINGS
APPROX. SOLID STEEL SHAFT BURST LIMIT
W
d
n
Externally pressurised bearings can be used over the whole range of loads and speeds

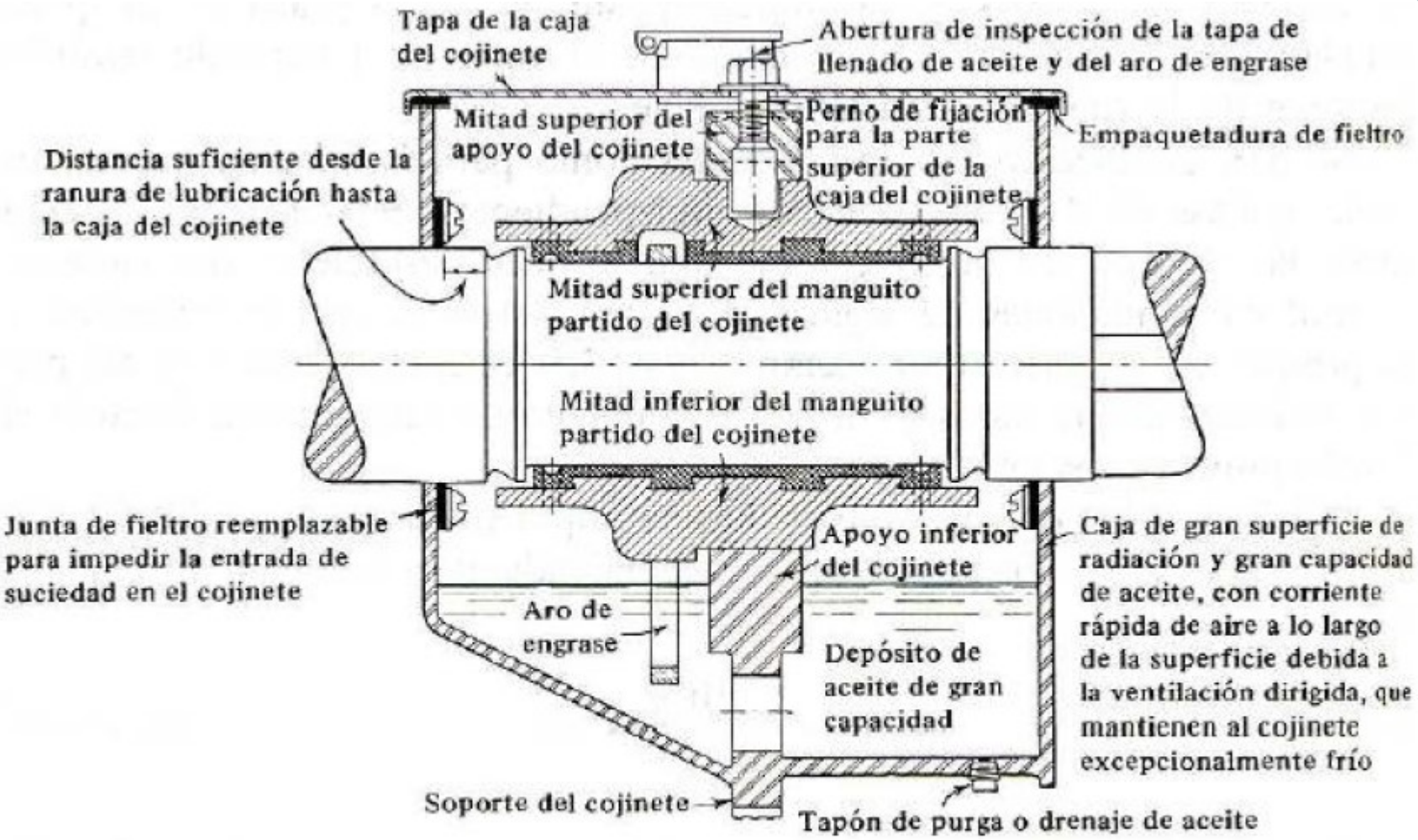
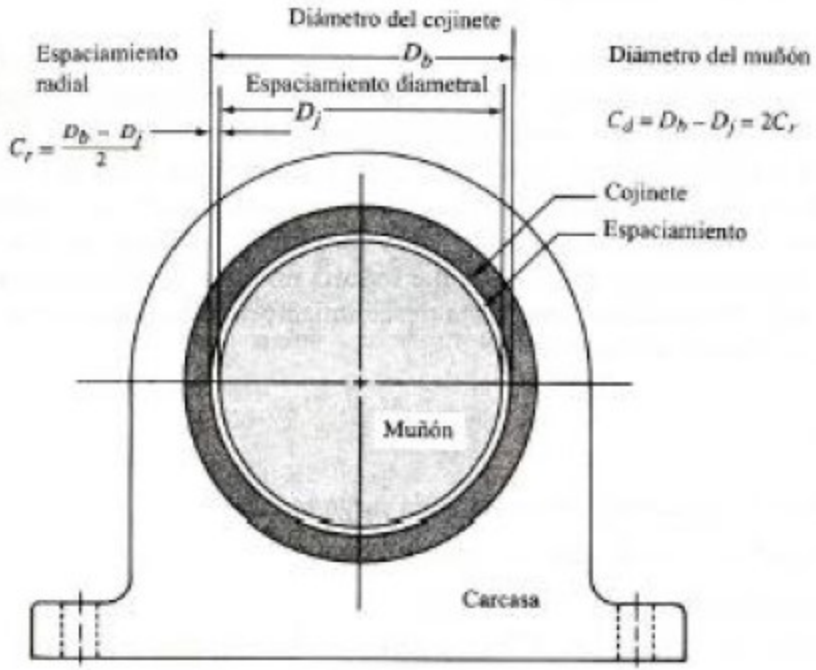
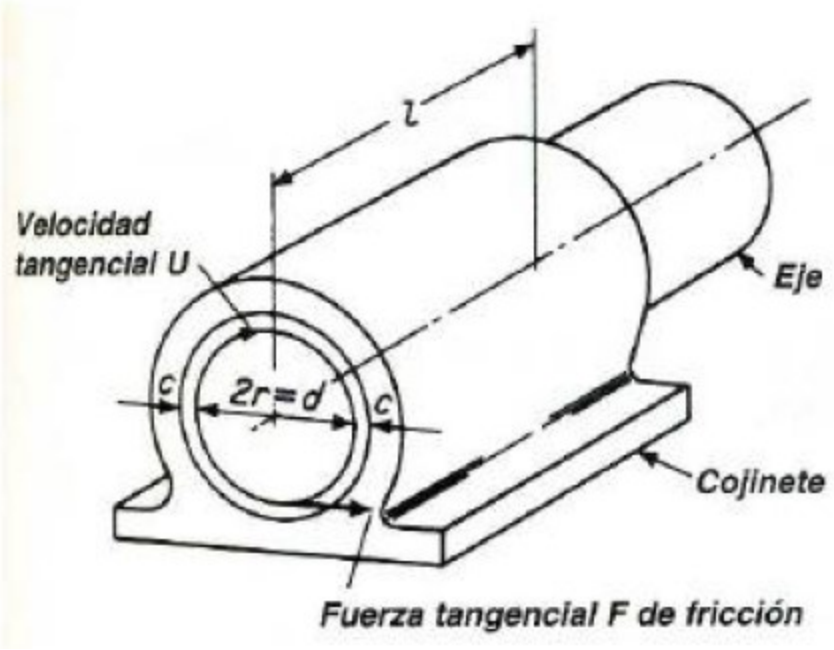
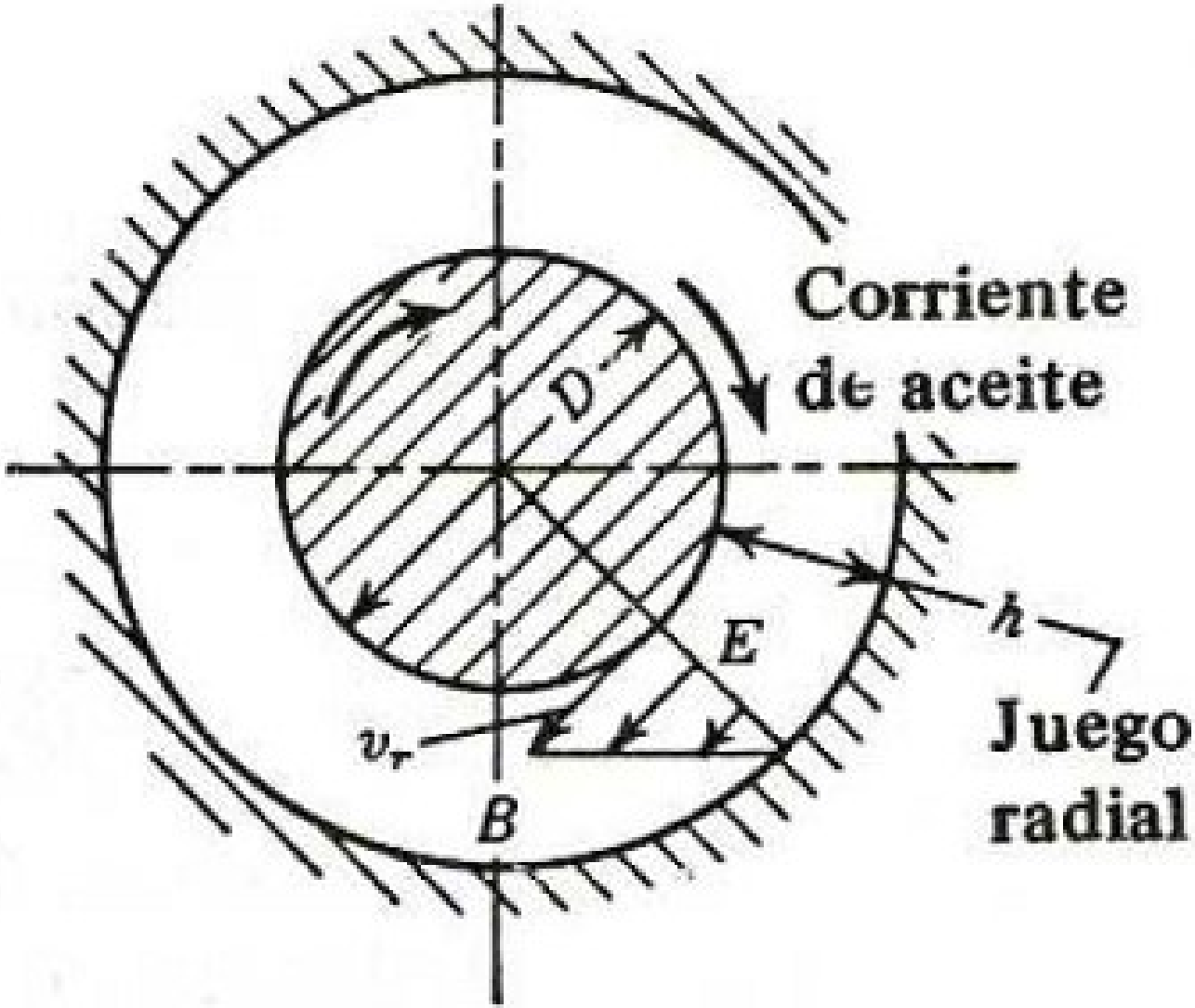


Figura 13.2: Detalles internos en un descanso deslizante partid


Diámetro del cojinete
D_b
Espaciamiento radial
Espaciamiento diametral
D_j
$C_r = \frac{D_b - D_j}{2}$
Diámetro del muñón
$C_d = D_b - D_j = 2C_r$
Cojinete
Espaciamiento
Muñón
Carcasa


l
Velocidad tangencial U
Eje
c
2r = d
c
Cojinete
Fuerza tangencial F de fricción


Corriente
de aceite
D
E
h
Juego
radial
v_r
B

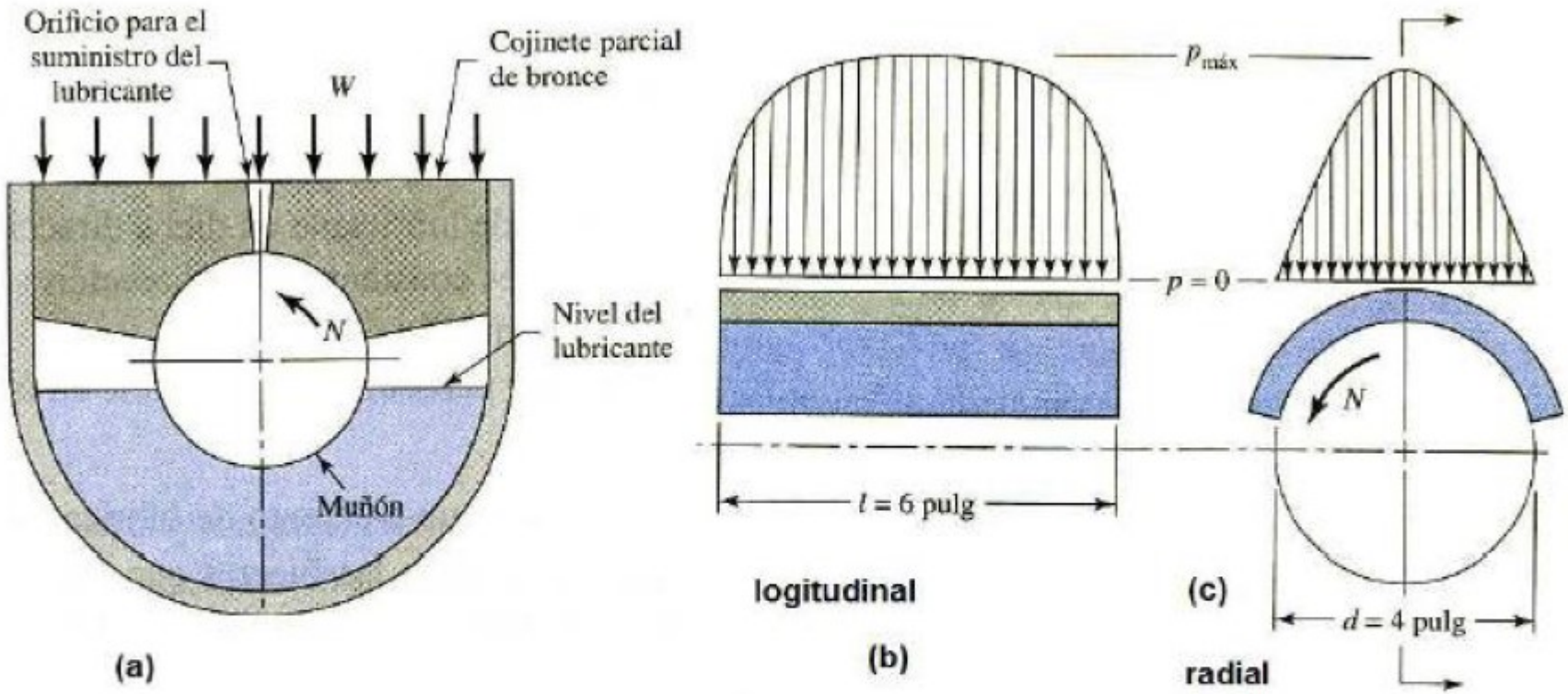
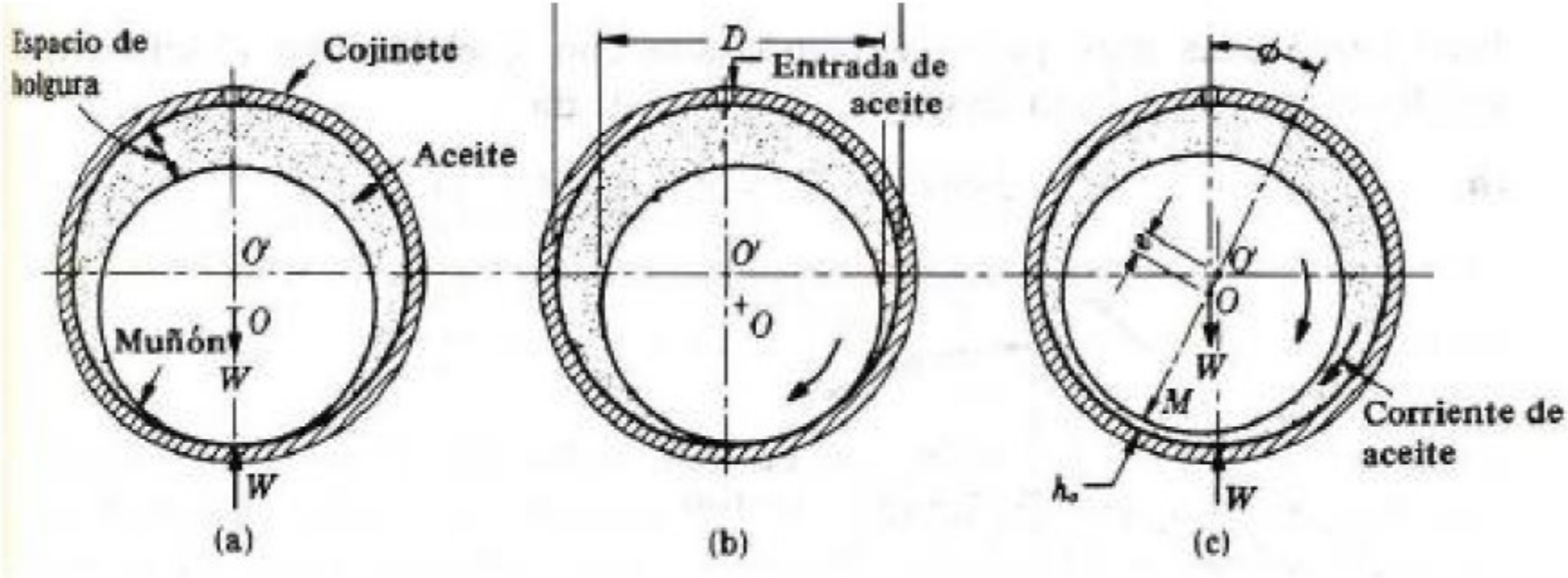
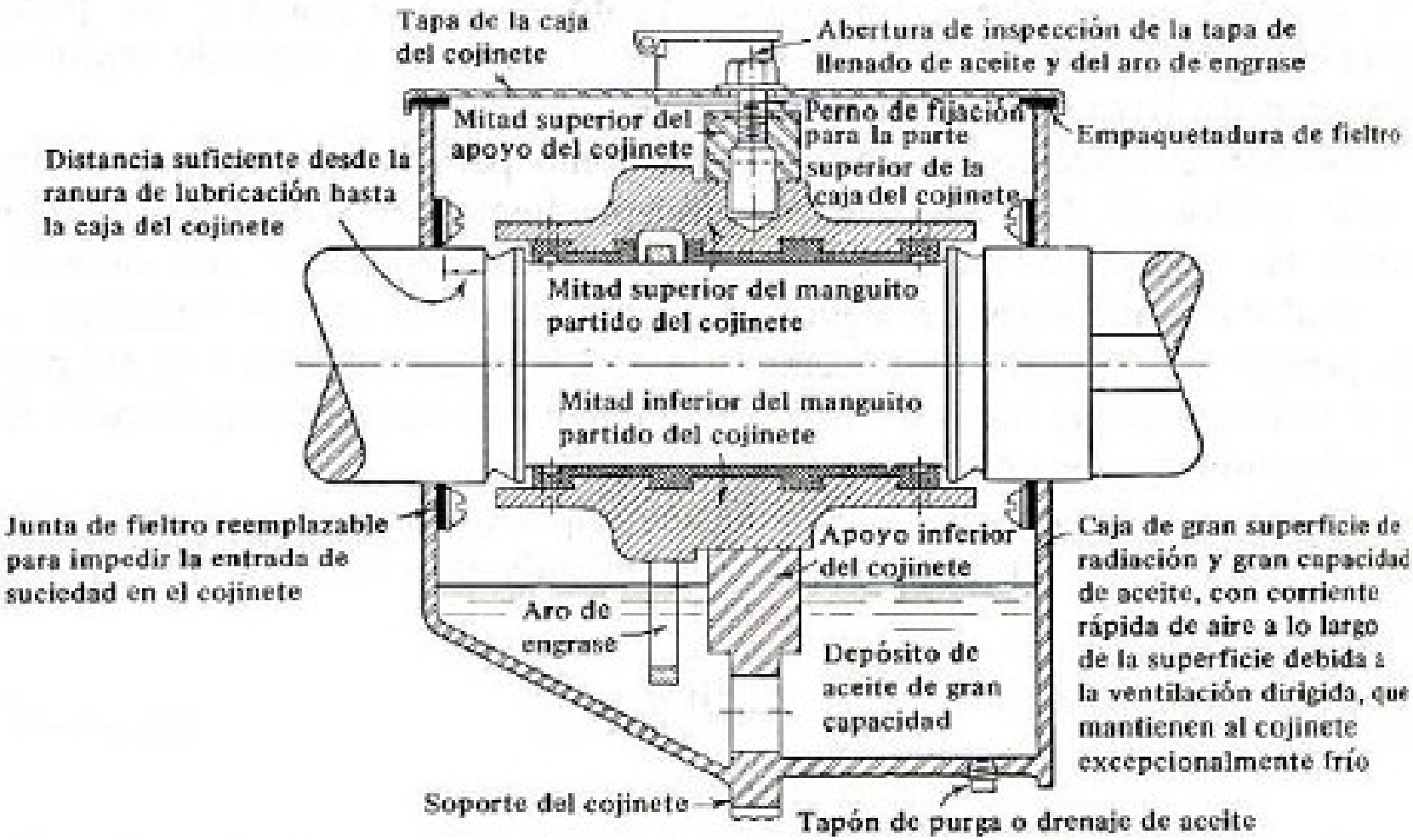
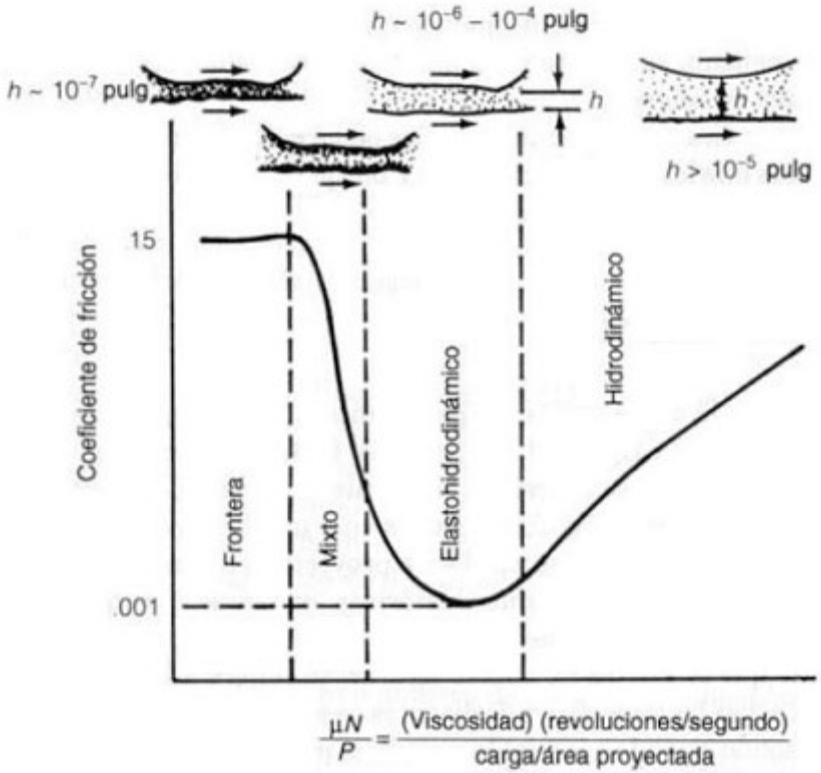
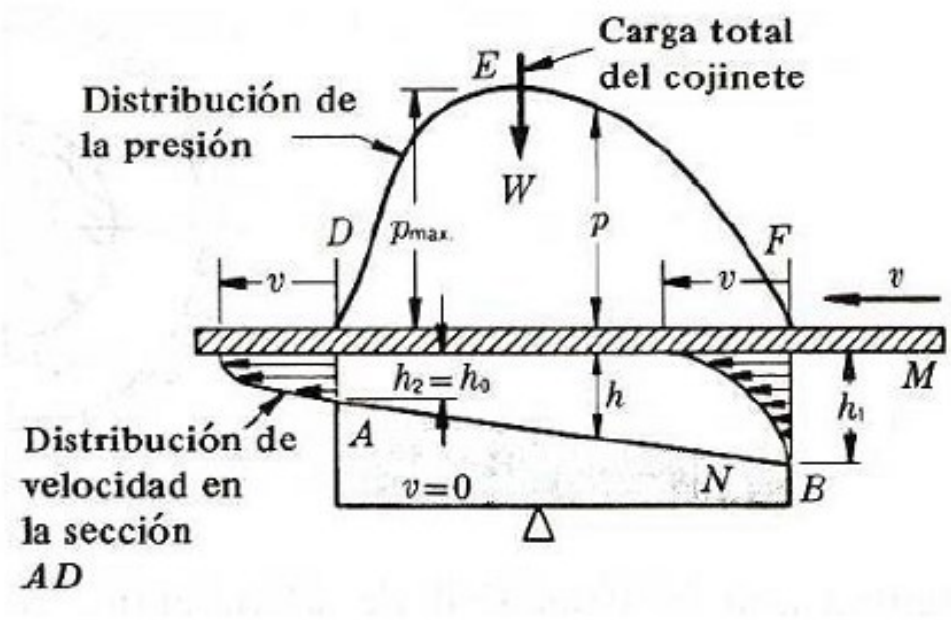


Figura 13.6: a) experimento según Tower en cojinete deslizante. b) d
ión de presiones longitudinales y c) distribución de presiones radia


Espacio de holgura
Cojinete
Aceite
O'
O
Muñón
W
W
(a)
D
Entrada de aceite
O'
O
(b)
O'
O
W
M
Corriente de aceite
W
(c)


Tapa de la caja del cojinete
Abertura de inspección de la tapa de llenado de aceite y del aro de engrase
Mitad superior del apoyo del cojinete
Perno de fijación para la parte superior de la caja del cojinete
Empaquetadura de fieltro
Distancia suficiente desde la ranura de lubricación hasta la caja del cojinete
Mitad superior del manguito partido del cojinete
Mitad inferior del manguito partido del cojinete
Junta de fieltro reemplazable para impedir la entrada de suciedad en el cojinete
Apoyo inferior del cojinete
Caja de gran superficie de radiación y gran capacidad de aceite, con corriente rápida de aire a lo largo de la superficie debida a la ventilación dirigida, que mantienen al cojinete excepcionalmente frío
Aro de engrase
Depósito de aceite de gran capacidad
Soporte del cojinete
Tapón de purga o drenaje de aceite


h ~ 10⁻⁶ – 10⁻⁴ pulg
h ~ 10⁻⁷ pulg
h
h > 10⁻⁵ pulg
15
.001
Coeficiente de fricción
Frontera
Mixto
Elastohidrodinámico
Hidrodinámico
μN/P = (Viscosidad) (revoluciones/segundo) / carga/área proyectada



$$\frac{d}{dx}\left(\frac{h^3}{\mu}\frac{dp}{dx}\right) = -6U\frac{dh}{dx}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial p}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial p}{\partial z}\right) = -6U\frac{\partial h}{\partial x}$$

Variables controladas

- La viscosidad μ
- La carga por unidad de área proyectada P
- La velocidad de rotación N
- Las dimensiones del cojinete tales como: r, c, β, l

Variables dependientes

- El coeficiente de fricción f
- Variación de temperatura ΔT
- Flujo de lubricante Q
- Espesor mínimo de película h_0

En resumen, se trata de definir límites satisfactorios para este segundo grupo de variables escogiendo valores adecuados del primer grupo para que estas limitaciones no se excedan.

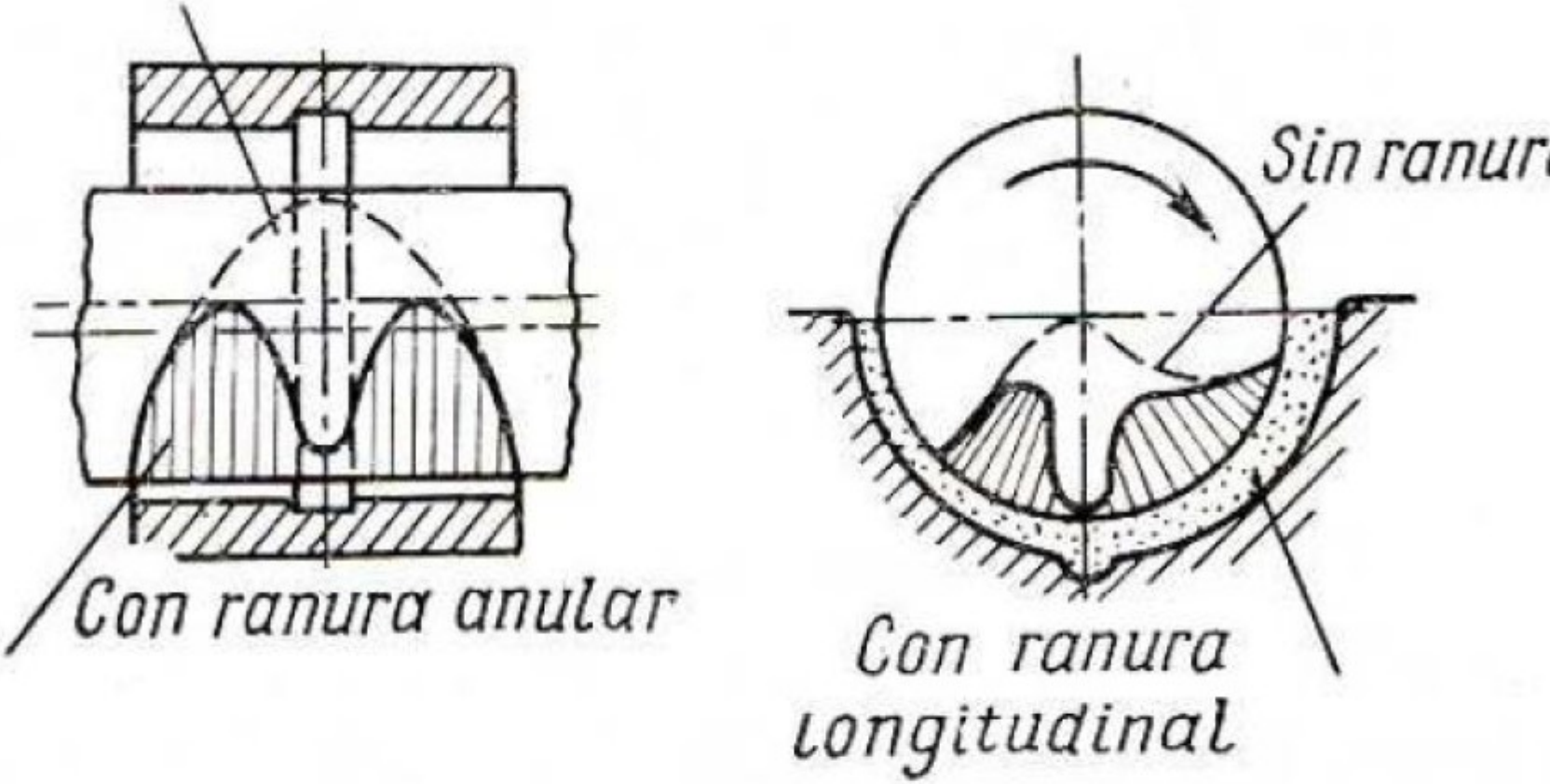


Figura 13.10: Perfil de presiones longitudinal y radial con ranur
tribución

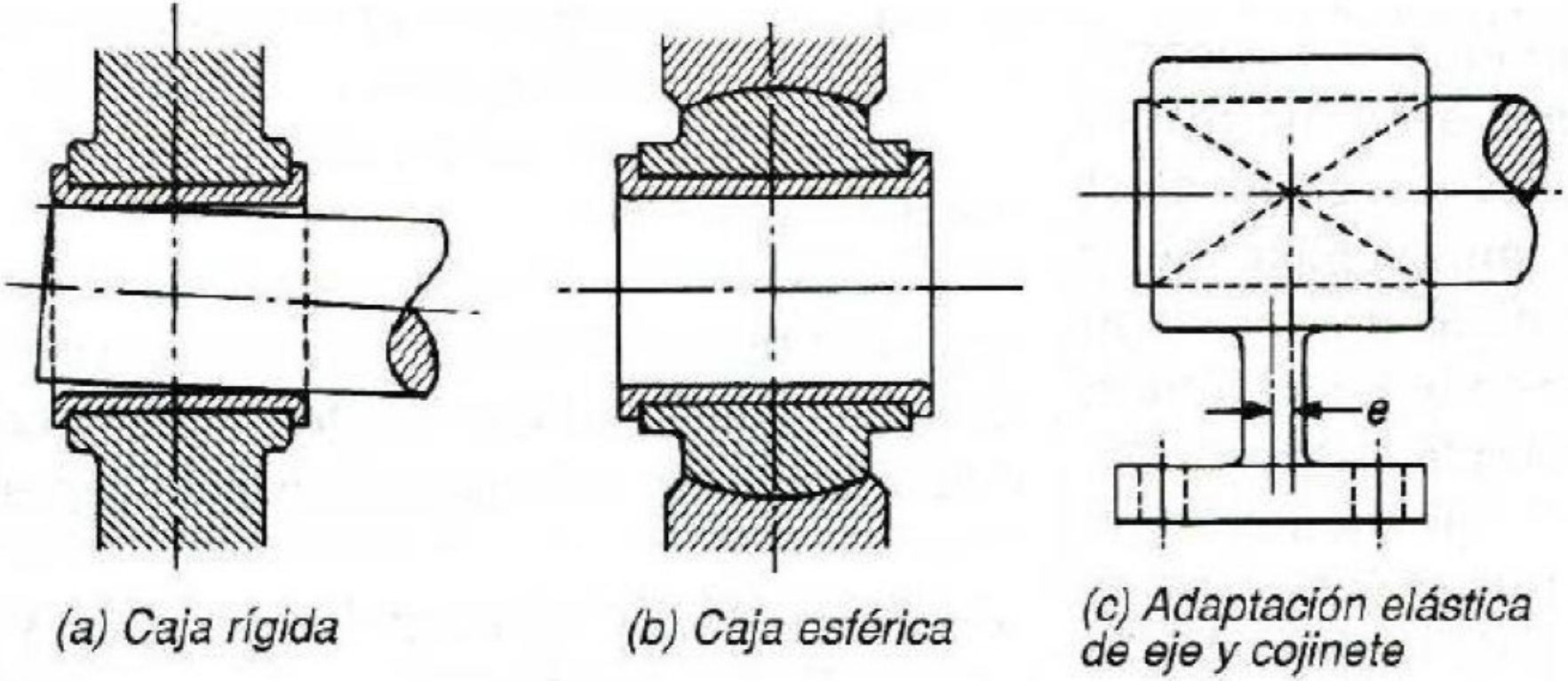


Figura 13.11: Tres tipos de descansos hidrodinámicos

$$T_{med} = T_i + \frac{\Delta T}{2} \tag{13.14}$$

con T_i la temperatura de entrada y ΔT la elevación de la temperatura hasta la salida. Con T_{med} se obtiene la viscosidad usada en las fórmulas y/o gráficos.

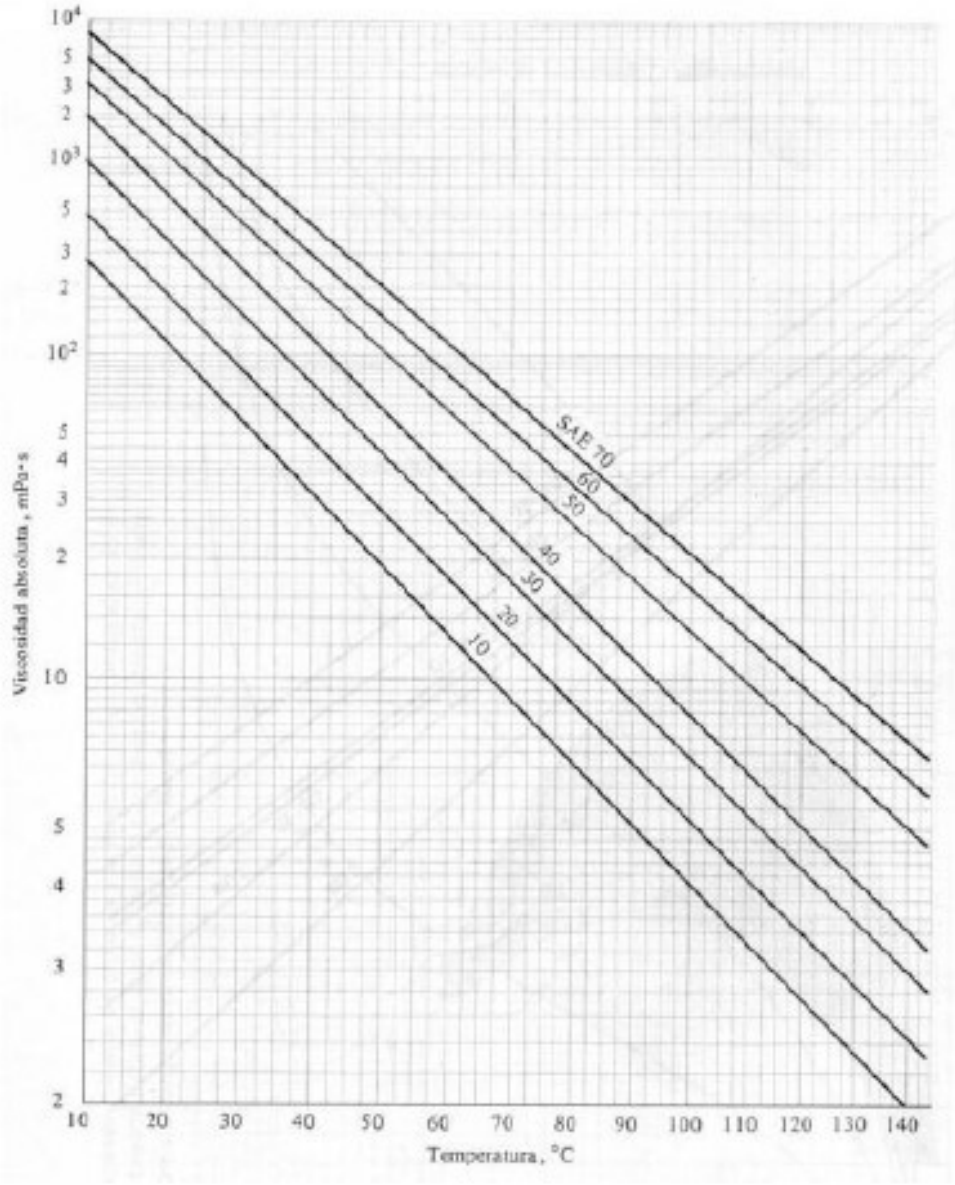


Figura 13.12: Diagrama viscosidad temperatura en unidades del sistema internacional para diferentes tipos de aceites

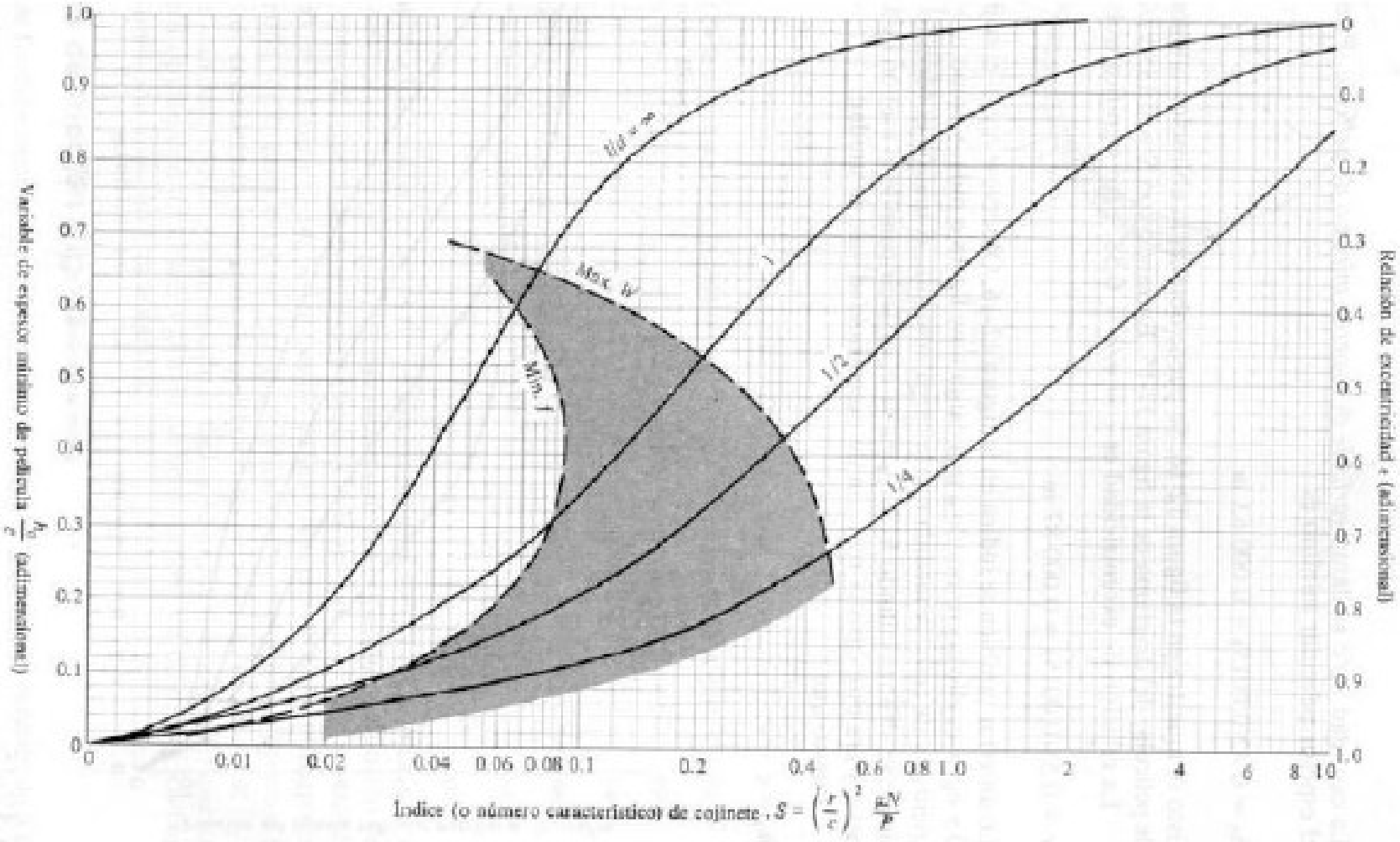
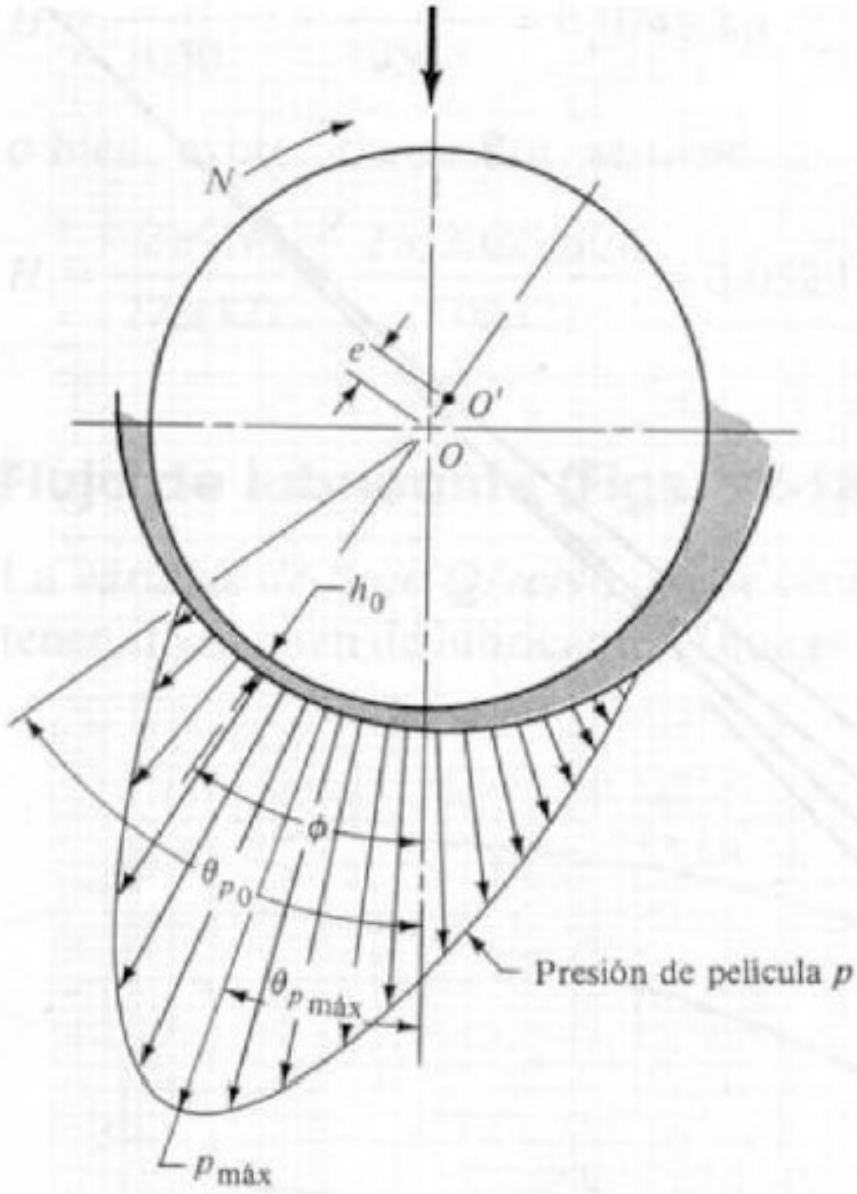


Figura 13.13: Diagrama de cálculo para el espesor mínimo h_0 de película


N
e
O'
O
h_0
ϕ
θ_{p0}
$\theta_{p\,máx}$
Presión de película p
$p_{máx}$

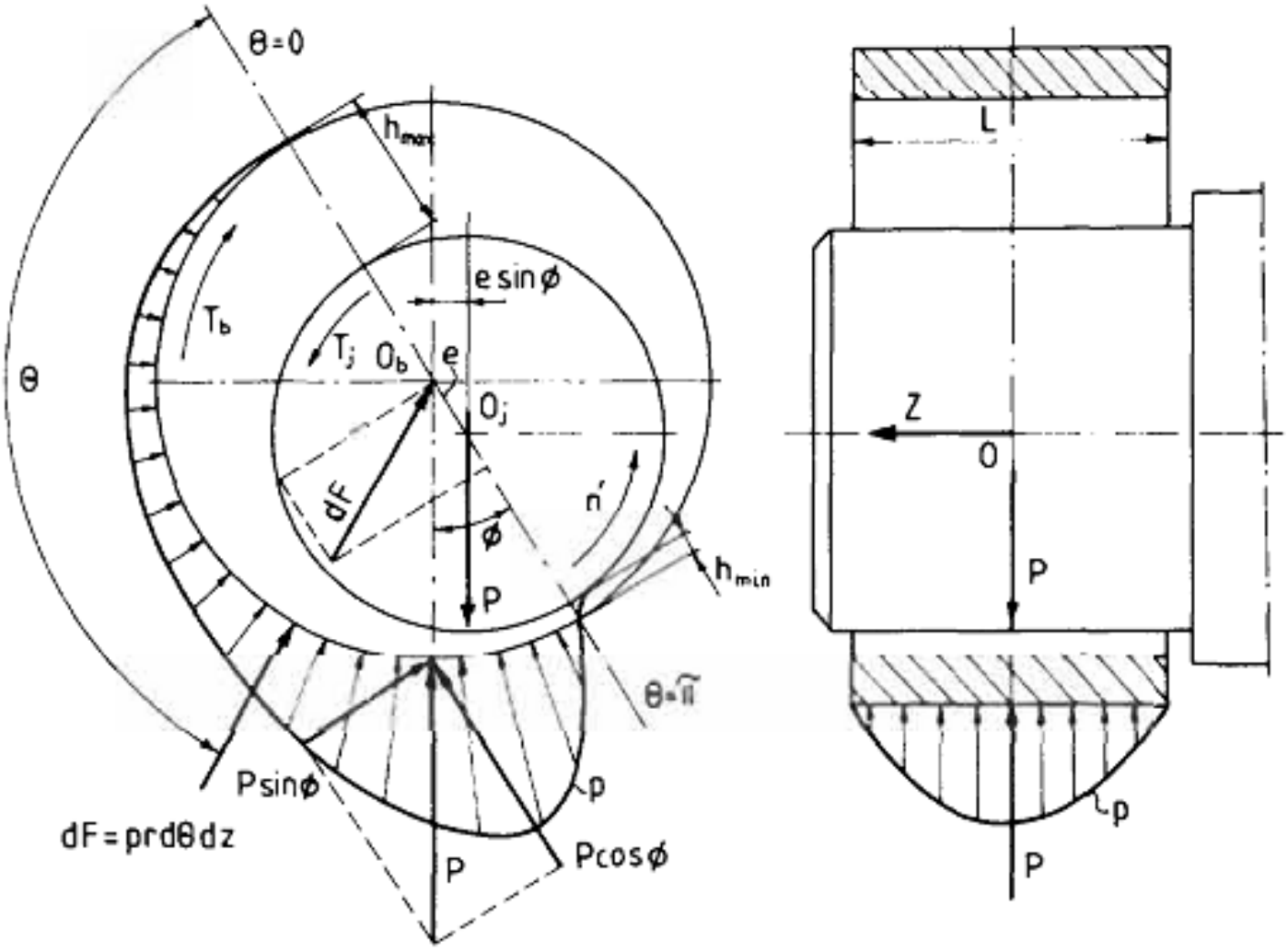
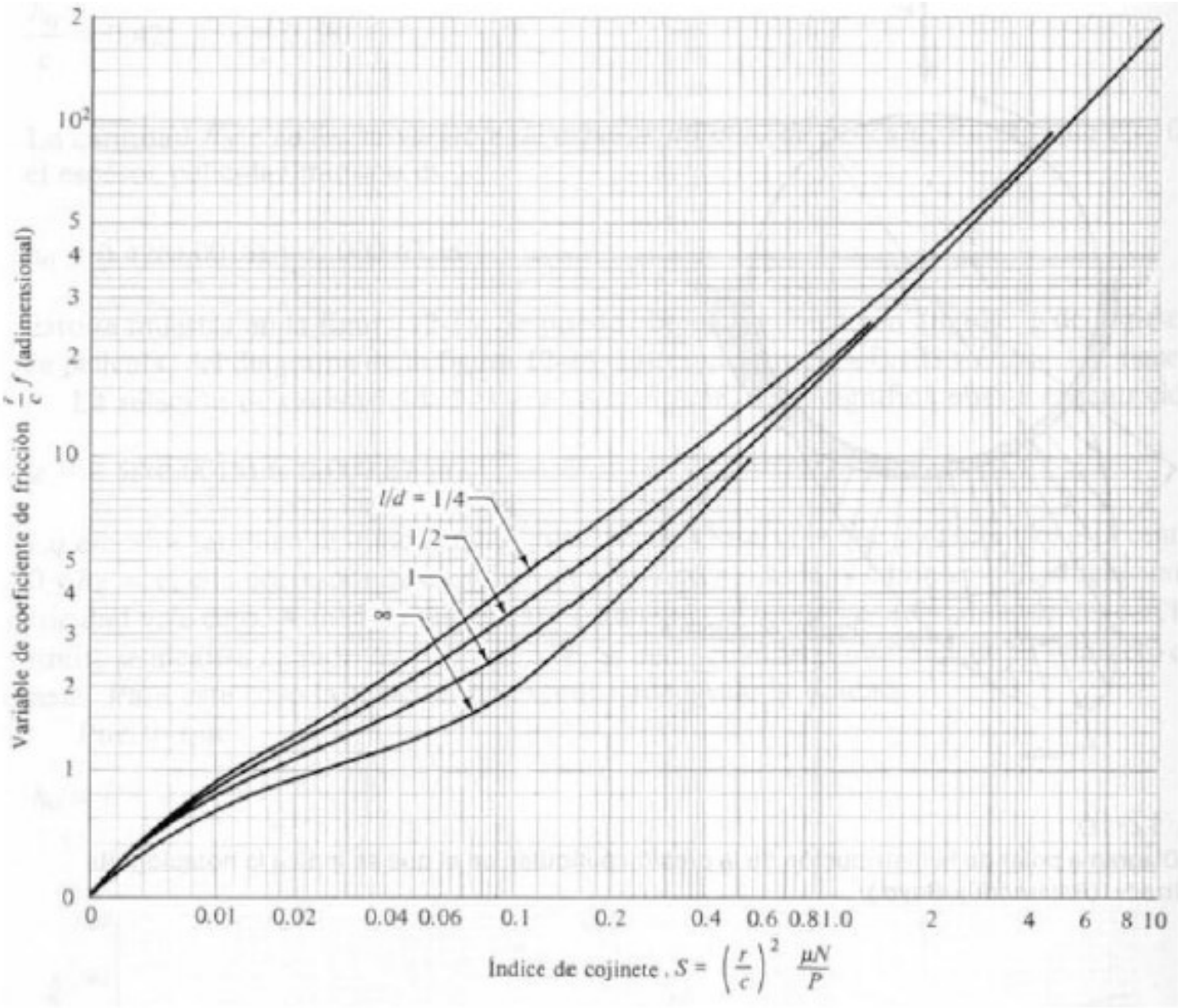

θ=0
h_max
e sinφ
T_b
T_j
O_b
e
θ
O_j
dF
n'
φ
P
h_min
θ=π
Psinφ
p
dF=prdθdz
P
Pcosφ
L
Z
O
P
p
P

Figura 13.16: Diagrama para determinar el coeficiente de fricción



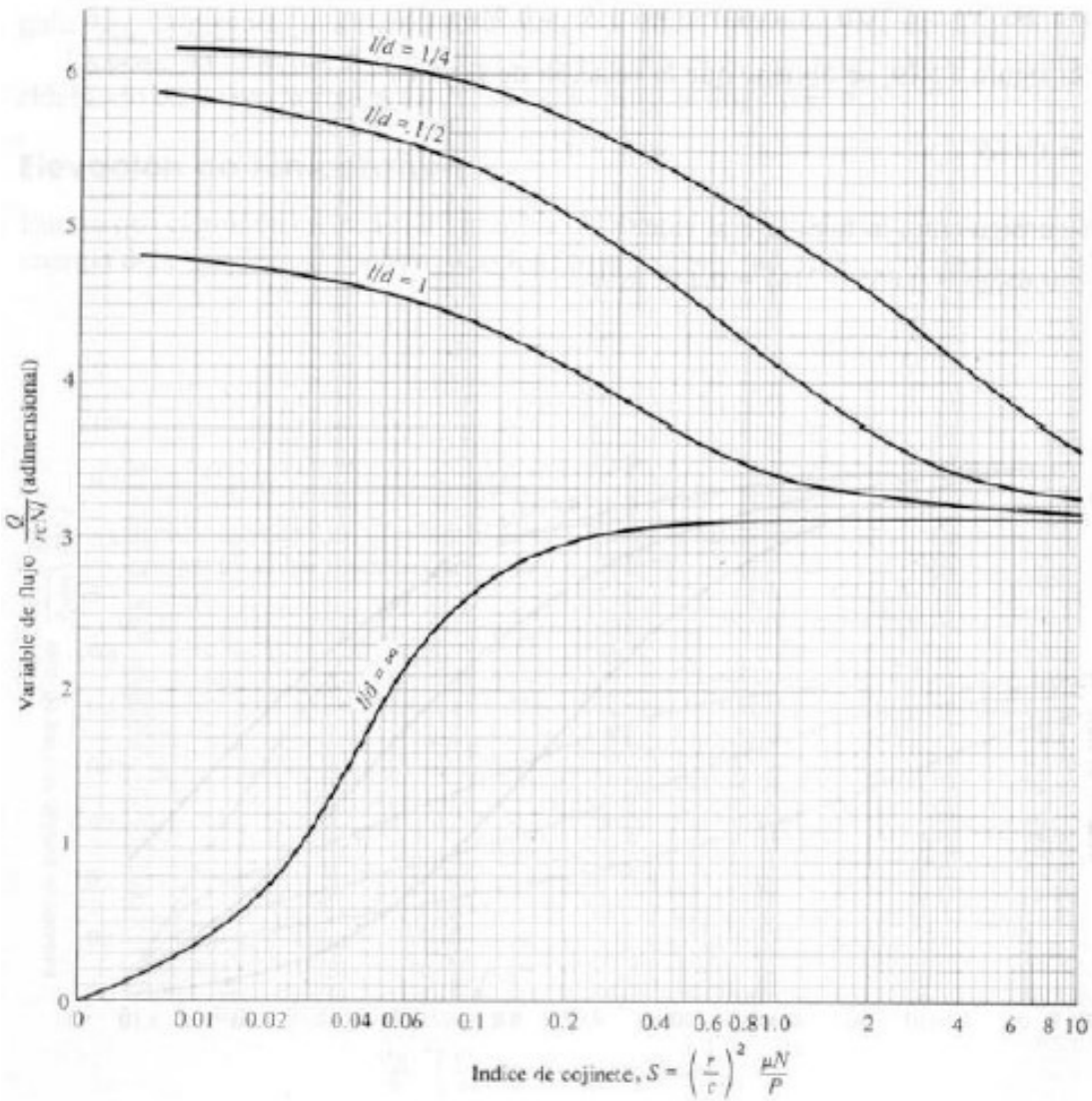


Figura 13.17: Diagrama para calcular el flujo Q total

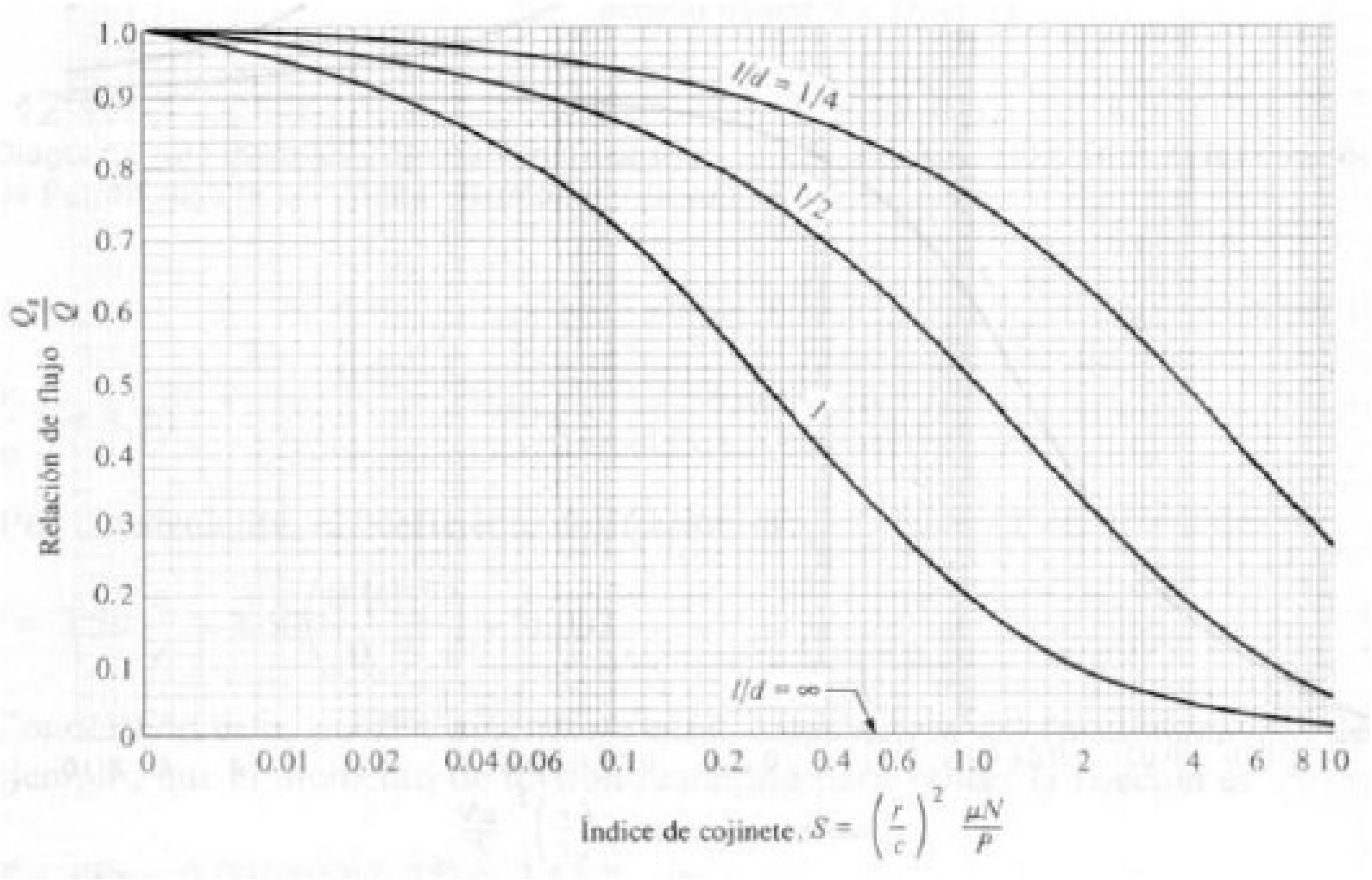


Figura 13.18: Diagrama para calcular el flujo lateral Q_s

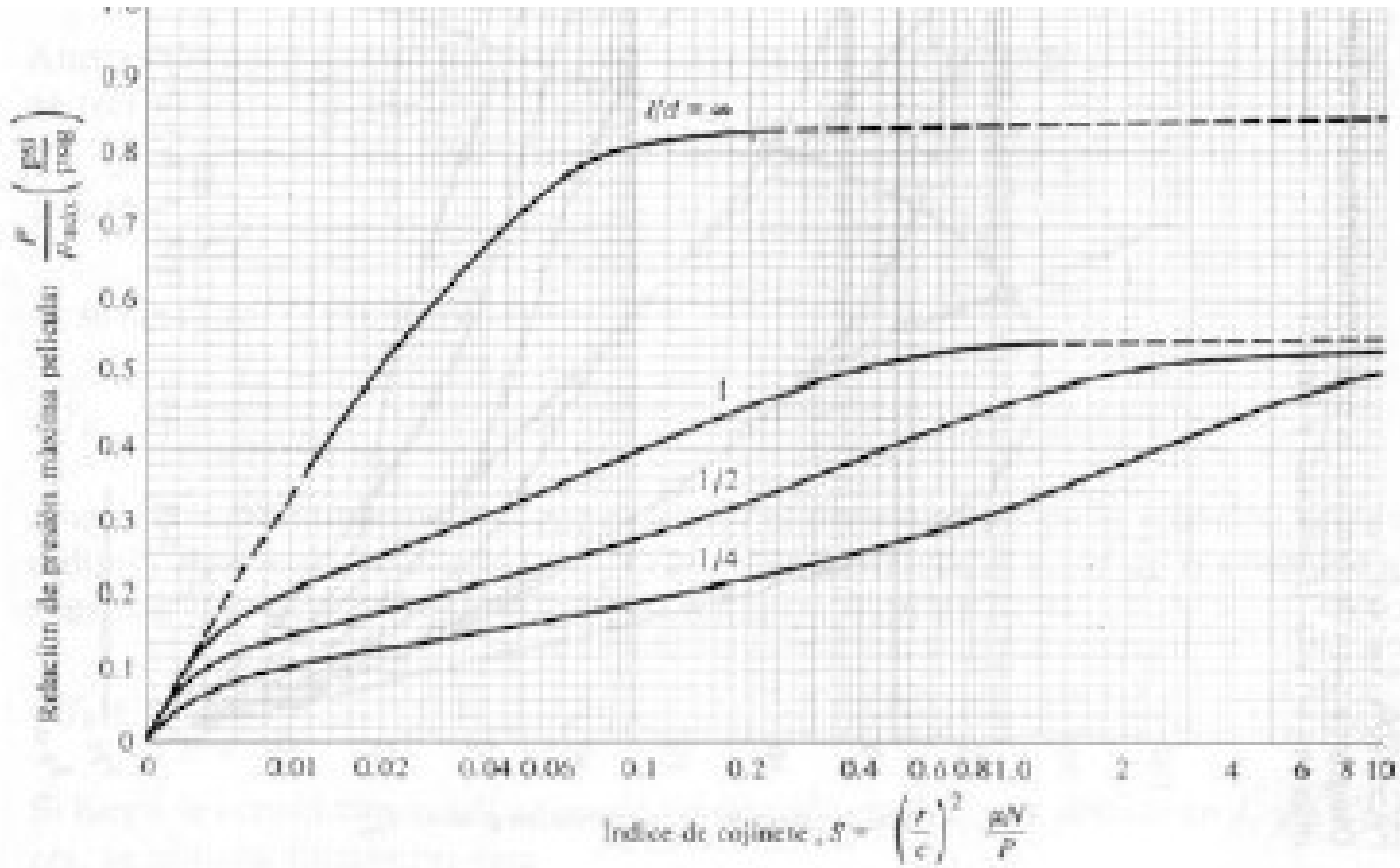


Figura 13.19: Diagrama para determinar la presión máxima p_{max} de la película

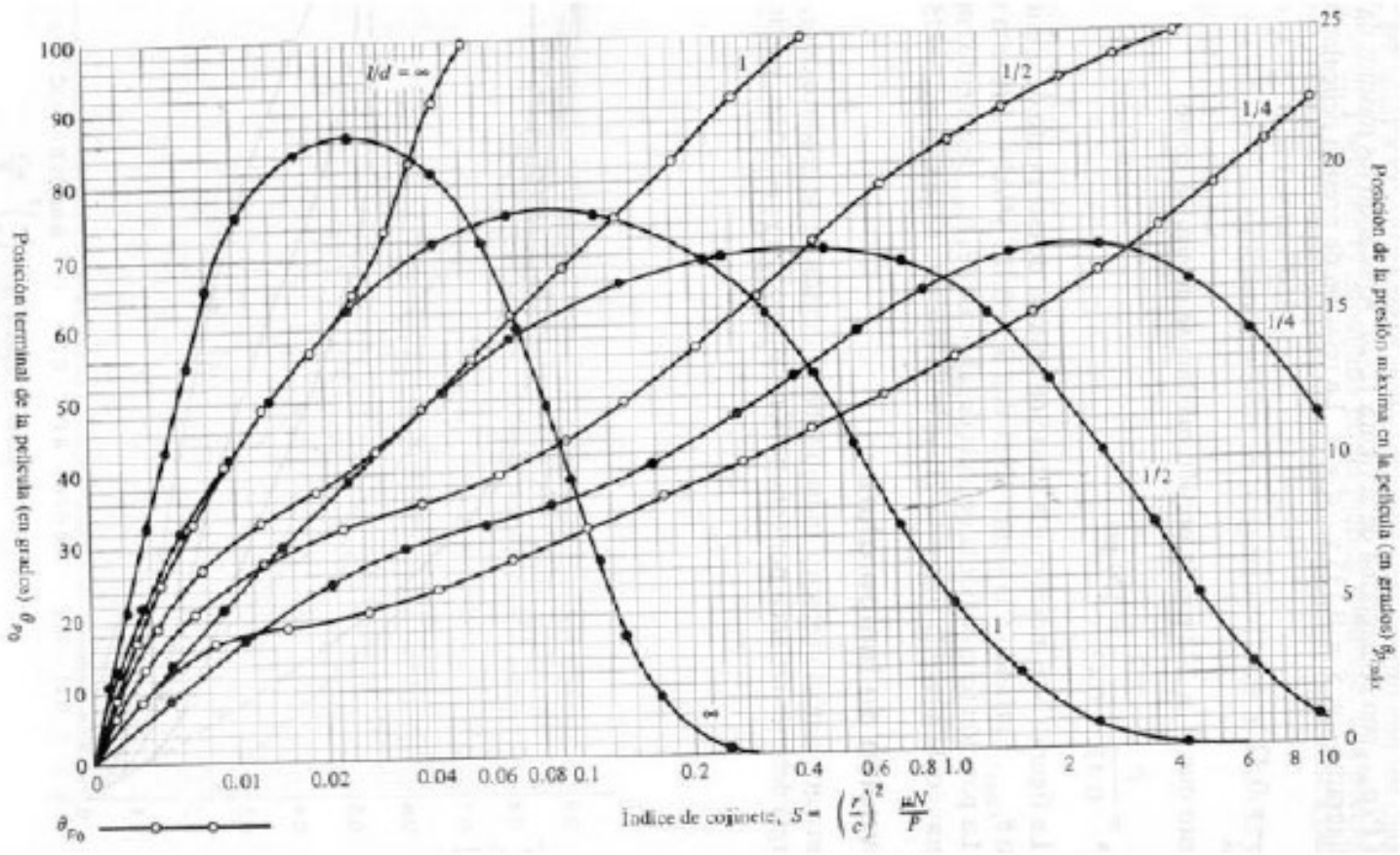


Figura 13.20: Diagrama para determinar la posición terminal de la película de lubricante y la de la presión máxima en ella